



TUGAS AKHIR - TE 141599

Estimasi Rugi-Rugi Energi pada Jaringan Distribusi Radial serta Penentuan Lokasi dan Kapasitas Optimal *Capacitor Bank* Berbasis *Geographic Information System (GIS)*

RIZKY NAFIAR RAFIANDI
NRP 0711 13 4000 0028

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D
Ir. Ni Ketut Aryani, M.T

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TE 141599

Energy Losses Estimation of Radial Distribution Network with Determination of Optimal Location and Capacity of Capacitor Bank Based on Geographic Information System (GIS)

Rizky Nafiar Rafiandi
NRP 0711 13 4000 0028

Advisor
Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D
Ir. Ni Ketut Aryani, M.T

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**Estimasi Rugi-Rugi Energi pada Jaringan Distribusi Radial serta Penentuan Lokasi dan Kapasitas Optimal Capacitor Bank Berbasis Geographic Information System (GIS)**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 11 Januari 2018



Rizky Nafiar Rafiandi
NRP. 07111340000028

Halaman ini sengaja dikosongkan

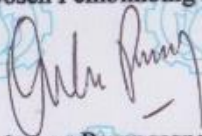
**ESTIMASI RUGI-RUGI ENERGI PADA JARINGAN
DISTRIBUSI RADIAL SERTA PENENTUAN LOKASI
DAN KAPASITAS OPTIMAL CAPACITOR BANK
BERBASIS *GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM*
(GIS)**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

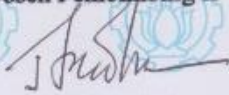
Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D.
NIP. 194907151974121001

Dosen Pembimbing II



Ir. Ni Ketut Aryani, MT.
NIP. 196509011991032002



Halaman ini sengaja dikosongkan

**Estimasi Rugi-Rugi Energi pada Jaringan Distribusi Radial serta
Penentuan Lokasi dan Kapasitas Optimal *Capacitor Bank* Berbasis
*Geographic Information System (GIS)***

Rizky Nafiar Rafiandi
07111340000028

Dosen Pembimbing I : Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D
Dosen Pembimbing II : Ir. Ni Ketut Aryani, M.T

ABSTRAK

Jaringan distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang menyumbang kerugian energi cukup besar. Salah satu indikator untuk mengetahui efisiensi pola operasi sistem kelistrikan pada jaringan distribusi adalah dengan melakukan perhitungan kerugian energi yang terjadi pada jaringan distribusi tersebut. Estimasi kerugian energi yang akurat memerlukan data yang cukup banyak dan teliti. Data tersebut relatif sulit diperoleh, seperti data saluran, datasheet trafo, dan data pembebanan pada gardu-gardu distribusi. Kerugian daya pada sistem jaringan distribusi dapat dikurangi dengan mensuplai daya reaktif pada sistem. Salah satu metode untuk mensuplai daya reaktif pada sistem adalah dengan memasang *capacitor bank* secara paralel pada jaringan.

Pada tugas akhir ini dilakukan penentuan lokasi dan kapasitas optimal untuk pemasangan *capacitor bank* menggunakan metode analitis pada penyulang Basuki Rahmat Kota Surabaya. Hasil yang didapatkan adalah lokasi optimal pemasangan kapasitor berada pada bus 25 dan 49, dengan masing-masing berkapasitas 2,3297 MVAR dan 0,1953 MVAR untuk interval 1. Untuk interval 2 kapasitor memiliki kapasitas optimal pada 2,7748 MVAR dan 0,2062 MVAR, serta interval 3 dengan kapasitas sebesar 3,4669 MVAR dan 0,2809 MVAR. Kemudian dilakukan perhitungan estimasi kerugian energi menggunakan metode *loss factor* ketika kondisi awal dan kondisi terkompensasi. Pada kondisi awal sistem mengalami kerugian energi sebesar 572,8623 MWh per tahun, sedangkan pada kondisi terkompensasi kerugian energi turun menjadi 553,3431 MWh per tahun. Hasil implementasi pada perangkat GIS menunjukkan lokasi pemasangan kapasitor berada pada Jalan Embong Gayam 25 Surabaya dan Jalan Embong Cerme 33 DPN Surabaya.

***Kata Kunci : Capacitor Bank, Geographical Information System (GIS),
Jaringan Distribusi Radial, Loss Factor, Metode Analitis.***

Halaman ini sengaja dikosongkan

Energy Losses Estimation of Radial Distribution Network with Determination of Optimal Location and Capacity of Capacitor Bank Based on Geographic Information System (GIS)

Rizky Nafiar Rafiandi
07111340000028

1st Advisor : Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D
2nd Advisor : Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

ABSTRACT

Distribution network is a part of power system that contribute much energy losses to the system. One indicator to analyze the power system operation in the distribution network is done by calculating its energy losses. To get most accurate result, we need many meticulous data that relatively was hard to find, such as line data, transformer datasheet, and load data. Power losses in the distribution network system can be reduced by supplying reactive power to the system. One of its method is by placing capacitor bank parallelly in the network.

Optimal location and sizing of capacitor bank using analytical method is presented in this research, considering Basuki Rahmat feeder in Surabaya. The result shows that the optimal location is on the bus number 25 and 49 with its optimal sizing is 2.3297 MVAR and 0.1953 MVAR respectively for interval 1, 2.7748 MVAR and 0.2062 MVAR for interval 2, and 3.4669 MVAR and 0.2809 MVAR for interval 3. Energy losses was estimated by using loss factor method in the condition of before and after capacitor bank operated. The result shows that before capacitor bank was operated on the system, the energy losses is 572.8623 MWh per year. After capacitor bank was operated, the energy losses reduced to 553.3431 MWh per year. This research also implemented in GIS software to know the real geographic location of capacitor bank placement. GIS show that bus 25 is located on Embong Gayam 25 Street Surabaya and bus 49 located in Embong Cerme 32 DPN Street Surabaya.

Keywords : Analytical Method, Capacitor Bank, Geographical Information System (GIS), Loss Factor, Radial Distribution Network.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, hidayah dan inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Estimasi Rugi-Rugi Energi pada Jaringan Distribusi Radial serta Penentuan Lokasi dan Kapasitas Optimal Capacitor Bank Berbasis Geographic Information System (GIS)”** dengan baik.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Keluarga yang telah banyak memberikan motivasi, semangat, dan doa untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D dan Ibu Ir. Ni Ketut Aryani, M.T selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran dan kritik serta bimbingan.
3. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku Kepala Departemen Teknik Elektro ITS., dan Bapak Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D selaku Ketua Program Studi S1.
4. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah banyak memberi ilmu selama penulis menempuh kuliah.
5. Rekan dan sahabat terkasih Indah Puspita Sari yang telah banyak memberi dorongan, semangat dan doa selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
6. Ahmad Febri Firmansah, ‘sahabat darjo’ yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
7. Rekan-rekan mahasiswa e-53 VLT Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah memberikan semangat serta keakraban selama masa studi kuliah.
8. Rekan-rekan asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik yang telah memberikan semangat serta pengalaman asisten yang penuh intelektualitas, integritas, dan prestatif.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini belum sempurna, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan. Semoga buku Tugas Akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, Januari 2018
Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan masalah	3
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	5

BAB II TEORI PENUNJANG

2.1 Jaringan Distribusi Tenaga Listrik Radial	7
2.2 Klasifikasi Beban	8
2.2.1 Klasifikasi Jenis Beban	8
2.2.2 Karakteristik Beban	8
2.3 Estimasi Kurva Beban Harian	11
2.3.1 Kurva Beban Harian Trafo Distribusi	11
2.3.2 Kurva Total Beban Harian	13
2.3.3 Kerugian Daya pada Transformator	13
2.4 Analisis Aliran Daya	14
2.4.1 Metode Topology Network	14
2.5 Rugi-rugi Daya Listrik	17
2.6 Deviasi Tegangan	18
2.7 Metode Analitis	19
2.7.1 Penentuan Kapasitas Optimal Kapasitor Bank	19
2.7.2 Penentuan Lokasi Kapasitor Bank	23
2.8 Kapasitor	23
2.9 <i>Load Factor</i> dan <i>Loss Factor</i>	24

2.10	Estimasi Kerugian Energi	26
2.11	Geographical Information System (GIS)	26
BAB III ESTIMASI KERUGIAN ENERGI DENGAN MENENTUKAN LOKASI DAN KAPASITAS OPTIMAL KAPASITOR BANK		
3.1	Konsep Dasar	27
3.1.1	Optimisasi Lokasi dan Kapasitas Kapasitor Bank	29
3.1.2	Estimasi Kerugian Energi Jaringan	32
3.1.3	Integrasi dengan Sistem GIS	34
3.2	Data Penelitian	35
BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS		
4.1	Estimasi Beban Harian	41
4.1.1	Pembebanan Trafo	41
4.1.2	Perhitungan Rugi-rugi Trafo	43
4.1.3	Pemodelan Kurva Beban Harian	46
4.2	Analisis Aliran Energi pada Kondisi Awal	48
4.3	Estimasi Kerugian Energi	49
4.3.1	Perhitungan <i>Load Factor</i>	49
4.3.2	Perhitungan <i>Loss Factor</i>	50
4.3.3	Hasil Estimasi	50
4.4	Hasil Optimisasi dengan Metode Analitis.....	52
4.5	Analisis Aliran Energi pada Kondisi setelah Pemasangan Kapasitor Bank.....	65
4.6	Penghematan Energi setelah Pemasangan Kapasitor Bank.....	68
4.6.1	Perhitungan <i>Load Factor</i>	68
4.6.2	Perhitungan <i>Loss Factor</i>	68
4.6.3	Hasil Estimasi	69
4.6.4	Penghematan Energi	70
4.7	Lokasi Geografis berbasis GIS.....	71
BAB V PENUTUP		
5.1	Kesimpulan	73
5.2	Saran	74

DAFTAR PUSTAKA	75
LAMPIRAN	77
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	133

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Saluran distribusi radial	7
Gambar 2.2	Kurva beban harian masing-masing jenis beban.....	9
Gambar 2.3	Karakteristik beban untuk residensial, komersial, dan industri.....	10
Gambar 2.4	Contoh single line diagram jaringan radial	15
Gambar 2.5	Ilustrasi saluran sederhana	17
Gambar 2.6	Ilustrasi saluran sederhana	18
Gambar 2.7	Ilustrasi Sederhana Sistem Radial.....	19
Gambar 2.8	Sistem radial yang terpasang kapasitor <i>bank</i>	20
Gambar 2.9	Contoh tampilan aplikasi GIS	26
Gambar 3.1	Diagram alir metode penelitian.....	28
Gambar 3.2	Diagram alir proses optimisasi jaringan	30
Gambar 3.3	Diagram alir metode estimasi kerugian energi	33
Gambar 3.4	<i>Interface</i> aplikasi GIS	34
Gambar 3.5	<i>Single Line Diagram</i> penyulang Basuki Rahmat.....	40
Gambar 4.1	Kurva beban harian penyulang Basuki Rahmat	47
Gambar 4.2	Kurva pembebanan dengan pembagian interval	53
Gambar 4.3	Kurva beban harian setelah pemasangan kapasitor.....	66
Gambar 4.4	Tampilan geografis penyulang Basuki Rahmat	71
Gambar 4.5	Letak geografis pemasangan kapasitor pertama	72
Gambar 4.6	Letak geografis pemasangan kapasitor kedua.....	72

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Kumpulan Formula <i>Loss Factor</i>	25
Tabel 3.1	Data pembebanan trafo	35
Tabel 3.2	Data referensi beban harian <i>weekday</i>	37
Tabel 3.3	<i>Datasheet</i> konstanta rugi-rugi transformator	39
Tabel 4.1	Hasil estimasi pembebanan trafo AF103	42
Tabel 4.2	Hasil analisis perhitungan kerugian trafo AF103	43
Tabel 4.3	Hasil analisis perhitungan total kerugian trafo	45
Tabel 4.4	Total pembebanan setiap jam penyulang Basuki Rahmat.....	46
Tabel 4.5	Analisis kerugian energi JTM penyulang Basuki Rahmat.....	48
Tabel 4.6	Hasil perhitungan <i>Loss Factor</i>	50
Tabel 4.7	Hasil Estimasi Kerugian Energi per hari penyulang Basuki Rahmat.....	51
Tabel 4.8	Estimasi Kerugian Energi dengan Analisis Aliran Energi	51
Tabel 4.9	Estimasi Kerugian Energi dengan <i>Loss Factor</i>	52
Tabel 4.10	Pembagian interval kurva pembebanan	53
Tabel 4.11	Hasil simulasi setiap interval	53
Tabel 4.12	Kapasitas optimal <i>capacitor bank</i> untuk setiap bus	54
Tabel 4.13	Kerugian daya setiap pemasangan kapasitor	56
Tabel 4.14	Kapasitas optimal <i>capacitor bank</i> kedua setiap bus ...	59
Tabel 4.15	Kerugian daya setiap pemasangan kapasitor	61
Tabel 4.16	Lokasi dan kapasitas optimal kapasitor <i>bank</i> pada (a) Interval 1, (b) Interval 2, (c) Interval 3	63
Tabel 4.17	Hasil operasi kapasitor <i>bank</i> pada jaringan	64
Tabel 4.18	Total pembebanan sistem akibat pengaruh kapasitor..	65
Tabel 4.19	Hasil aliran energi pada kondisi setelah pemasangan kapasitor.....	67
Tabel 4.20	Hasil perhitungan <i>Loss Factor</i>	68
Tabel 4.21	Hasil Estimasi Kerugian Energi per hari penyulang Basuki Rahmat.....	69
Tabel 4.22	Estimasi Kerugian Energi dengan Analisis Aliran Energi	70
Tabel 4.23	Estimasi Kerugian Energi dengan <i>Loss Factor</i>	70
Tabel 4.24	Penghematan energi pada jaringan	70
Tabel 4.25	Penempatan kapasitor berdasarkan letak geografis	71

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jaringan distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang menyumbang kerugian energi cukup besar. Kerugian energi yang besar ini dikarenakan penurunan level tegangan yang menyebabkan arus yang lebih besar mengalir pada jaringan sehingga kerugian daya dalam hitungan waktu juga semakin besar. Salah satu indikator untuk mengetahui efisiensi pola operasi sistem kelistrikan pada jaringan distribusi adalah dengan melakukan perhitungan kerugian energi yang terjadi pada jaringan distribusi tersebut [1].

Kerugian daya pada sistem jaringan distribusi dapat dikurangi dengan melakukan suplai daya reaktif pada sistem. Salah satu metode untuk melakukan suplai daya reaktif pada sistem adalah dengan memasang *capacitor bank* secara paralel pada jaringan. Berdasarkan kerugian daya yang terjadi pada sistem jaringan distribusi akan dapat dilakukan estimasi kerugian energi yang terjadi pada sistem jaringan distribusi.

Estimasi kerugian energi yang akurat memerlukan data yang cukup banyak dan teliti. Data tersebut relatif sulit diperoleh, seperti data saluran, datasheet trafo, dan data pembebanan pada gardu-gardu distribusi. PT. PLN umumnya memiliki data pembebanan pada saluran outgoing yang keluar dari gardu induk setiap 15 menit dengan menggunakan SCADA [2]. Data tersebut dicatat selama 24 jam yang disebut sebagai kurva beban harian penyulang.

Pada tugas akhir ini akan dilakukan penentuan lokasi dan kapasitas yang optimal untuk pemasangan *capacitor bank* pada jaringan distribusi radial menggunakan metode analitis. Metode analitis yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini memiliki keunggulan yakni dikembangkan berdasarkan persamaan matematis baru yang diharapkan mampu memberikan hasil yang lebih ilmiah, komperhensif, dan lebih akurat [3], sehingga dapat diterapkan pada jaringan distribusi radial yang besar. Kemudian akan dilakukan pula perhitungan estimasi kerugian energi pada jaringan distribusi menggunakan metode *loss factor*. Estimasi kerugian energi pada jaringan menggunakan *loss factor* memiliki keunggulan yakni perhitungan yang lebih cepat dibandingkan

dengan metode analisis aliran energi, yakni hanya memerlukan perhitungan ketika beban puncak terjadi [4].

Hasil yang didapatkan akan diimplementasikan pada perangkat lunak GIS untuk mendapatkan tampilan geografis lokasi pemasangan *capacitor bank* sehingga diperoleh lokasi yang realistis sesuai dengan kondisi di lapangan [5], sebagai pertimbangan non-teknis pemasangan *capacitor bank* di lapangan. Dengan mengetahui secara geografis lokasi pemasangan *capacitor bank* di lapangan, hal ini diharapkan dapat membantu dalam proses perencanaan dan pengembangan sistem karena semakin mendekati dengan kondisi secara real di lapangan.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas dalam Tugas Akhir adalah :

1. Bagaimana menentukan lokasi penempatan dan kapasitas optimal *capacitor bank* yang optimal menggunakan metode analitis pada jaringan distribusi radial dengan mempertimbangkan rugi – rugi daya listrik pada jaringan ?
2. Bagaimana mengestimasi kerugian energi pada jaringan distribusi radial menggunakan metode *loss factor* ?
3. Bagaimana penerapan dan integrasi metode analitis untuk menentukan lokasi penempatan dan kapasitas optimal pemasangan *capacitor bank* pada jaringan distribusi radial beserta estimasi kerugian energinya berbasis GIS ?

1.3 Tujuan

Penelitian pada Tugas Akhir ini bertujuan sebagai berikut :

1. Menentukan lokasi penempatan dan kapasitas optimal *capacitor bank* yang optimal menggunakan metode analitis pada jaringan distribusi radial dengan mempertimbangkan rugi – rugi daya listrik pada jaringan.
2. Mengestimasi kerugian energi pada jaringan distribusi radial menggunakan metode *loss factor*.
3. Menerapkan dan mengintegrasikan metode analitis untuk menentukan lokasi penempatan dan kapasitas optimal pemasangan *capacitor bank* pada jaringan distribusi radial beserta estimasi kerugian energinya berbasis GIS.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada Tugas Akhir ini sebagai berikut :

1. Optimisasi fungsi objektif yang digunakan pada metode analitis untuk menentukan lokasi dan kapasitas pemasangan kapasitor adalah meminimalkan rugi – rugi daya pada saluran. Sedangkan nilai tegangan akan digunakan sebagai salah satu pertimbangan dan evaluasi untuk pemasangan kapasitor berikutnya.
2. Analisis pada sistem dalam keadaan seimbang ($R = S = T$).
3. Analisis rugi-rugi energi meliputi rugi-rugi pada JTM dan Trafo.
4. Menggunakan sistem distribusi penyulang Basuki Rahmat Kota Surabaya dalam keadaan seimbang.
5. Data pembebanan trafo diasumsikan diukur pada beban puncak dan pada kondisi pembebanan penuh (80% dari kapasitas).
6. Pemasangan kapasitor dimodelkan sebagai negatif *Q load*.
7. Tidak memperhatikan kualitas daya listrik selain rugi – rugi saluran dan profil tegangan.
8. Perangkat lunak GIS yang digunakan adalah *Smallworld 12.3 General Electric*.

1.5 Metodologi

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan studi terhadap literatur yang bertujuan untuk memperoleh referensi, data-data, dan hasil pada penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya. Literatur dan referensi yang menjadi obyek studi berasal dari jurnal ilmiah, artikel ilmiah, buku, dan internet. Studi literatur fokus pada kajian terhadap metode analitis yang digunakan untuk optimisasi penentuan lokasi dan kapasitas optimal *capacitor bank*, analisis aliran daya pada sistem radial, estimasi kerugian energi pada jaringan, serta perancangan *user interface* berbasis GIS.

2. Pengumpulan Data

Data yang digunakan untuk melakukan optimisasi penentuan lokasi dan kapasitas optimal *capacitor bank* meliputi data jaringan sistem distribusi berupa data pembebanan dan data saluran. Sedangkan untuk melakukan estimasi kerugian energi pada jaringan dibutuhkan data tambahan berupa kurva beban harian dan datasheet trafo.

3. Pemodelan Sistem dan Perancangan Perangkat Lunak

Pada tahap ini dilakukan pemodelan dan perhitungan awal menggunakan program MATLAB yang meliputi pemodelan sistem

distribusi, aliran daya, serta metode analitis untuk penentuan lokasi dan kapasitas optimal pemasangan *capacitor bank*. Selanjutnya, estimasi kerugian energi pada jaringan dihitung menggunakan metode *loss factor*. Program MATLAB yang telah divalidasi akan dikonversi pada aplikasi *Smallworld 12.3* berbasis GIS.

4. Simulasi dan Analisis

Pada tahap ini dilakukan simulasi berbasis program MATLAB untuk melakukan optimisasi penentuan lokasi dan kapasitas optimal *capacitor bank* menggunakan metode analitis serta perhitungan estimasi kerugian energi menggunakan metode *loss factor*. Setelah program pada MATLAB selesai dirancang, maka dilakukan simulasi dan validasi. Jika hasil simulasi menggunakan MATLAB telah valid, maka dilakukan perancangan pada program *Smallworld 12.3* berbasis GIS sehingga dapat diperoleh lokasi geografis pemasangan *capacitor bank* tersebut.

5. Penulisan Buku Tugas Akhir

Tahap ini merupakan tahap terakhir dari rangkaian penelitian tugas akhir. Penulisan buku tugas akhir dilakukan sebagai bentuk laporan tertulis dari proses dan hasil kerja penelitian tugas akhir yang telah selesai dilakukan. Buku tugas akhir membahas mengenai permasalahan, landasan teori dan metode yang digunakan pada penelitian, hasil dan analisis sebelum dan sesudah adanya pemasangan *capacitor bank* pada sistem, khususnya pada nilai rugi – rugi energi pada saluran dan profil tegangan pada sistem, serta hasil estimasi kerugian energi berbasis *loss factor*.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan laporan tugas akhir ini terdiri dari lima bab. Adapun susunan dari laporan penelitian ini adalah sebagai berikut :

BAB I Pendahuluan

Bab ini merupakan bagian awal dari laporan penelitian tugas akhir yang dikerjakan. Bab ini berisi penjelasan dan uraian mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi pada penelitian tugas akhir yang dikerjakan.

BAB II Teori Penunjang

Bab ini berisi teori penunjang yang membahas mengenai sistem distribusi radial, analisis aliran daya *topology network*, rugi-

rugi saluran sistem distribusi, metode analitis untuk optimisasi penentuan lokasi dan kapasitas optimal *capacitor bank*, estimasi kerugian energi menggunakan metode *loss factor*, dan *Geographical Information System (GIS)*.

BAB III Perancangan dan Pemodelan Sistem

Bab ini membahas mengenai penerapan metode analitis untuk menentukan lokasi dan kapasitas optimal *capacitor bank* pada sistem distribusi radial serta metode perhitungan estimasi kerugian energi pada jaringan berbasis *loss factor*.

BAB IV Simulasi dan Analisis

Bab ini berisi hasil dan pembahasan terkait simulasi berbasis program MATLAB dan *Smallworld 12.3 GIS* yang dilakukan.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Bab ini memberikan penjelasan mengenai kesimpulan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

1.7 Relevansi

Penelitian tugas akhir ini diharapkan dapat memperoleh hasil yang dapat memberikan manfaat, antara lain :

1. Menjadi sebuah referensi dalam melakukan optimisasi sistem dengan mengurangi rugi-rugi daya dan meningkatkan profil tegangan sistem menggunakan *capacitor bank*.
2. Menjadi sebuah referensi bagi perusahaan listrik dalam mengestimasi kerugian energi pada jaringan distribusi radial dengan cepat dan tepat berdasarkan data pengukuran yang minimal.
3. Menjadi salah satu langkah untuk meningkatkan pengembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK) dan penerapannya secara nyata di bidang sistem tenaga listrik.
4. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang hendak melaksanakan penelitian tugas akhir dengan topik seputar sistem tenaga listrik.

NOMENKLATUR

Pn_{res}	Estimasi pembebanan
Pn_{ref_res}	Daya referensi beban residensial jam 1 – 24
P_{ref_res}	Daya referensi beban residensial ketika pengukuran
$pf_{n_{ref_res}}$	Faktor daya referensi beban residensial jam 1 – 24 (%)
kVA_{rated}	Rating transformer
lf	Prosentase pembebanan trafo (%)
lc_{res}	Komposisi pembebanan untuk beban residensial (%)
$kW_{loss-trf-L}$	Kerugian berbeban trafo (kW)
kW_{load}	Beban trafo (kVA)
kW_{rated}	Kapasitas trafo (kVA)
kW_{loss-R}	Konstanta kerugian berbeban trafo (kW)
$kW_{loss-trf-T}$	Total kerugian trafo (kW)
$kW_{loss-trf-NL}$	Total kerugian tidak berbeban trafo (kW)
F_d	<i>Load Factor</i>
T	Periode
S	Daya yang ditransmisikan
S_{max}	Daya maksimum yang ditransmisikan
F_s	<i>Loss Factor</i>
$P_{loadloss}$	Kerugian daya berbeban
$P_{max\ loadloss}$	Kerugian daya ketika beban puncak
E_{loss-T}	Kerugian energi total selama setahun
$E_{loss-load}$	Kerugian energi kondisi berbeban
$E_{loss-no\ load}$	Kerugian energi kondisi tidak berbeban
H	Jumlah hari dalam setahun (365 hari)
$P_{max\ loadloss}$	Kerugian daya sesaat ketika beban puncak
F_s	<i>Loss Factor</i>
$P_{no\ load}$	Kerugian daya kondisi tidak berbeban.
$S_{n/m}$	Daya kompleks bus ke – n/m
$P_{n/m}$	Daya aktif bus ke – n/m
$Q_{n/m}$	Daya reaktif bus ke – n/m
PL_i	Daya aktif total beban bus ke -n
QL_i	Daya reaktif total beban bus ke -n
TP_{loss}	Total rugi daya pada sistem
$TP_{loss_{cap}}$	Total rugi daya pada sistem setelah dipasang kapasitor pada sistem
P_{loss_n}	Rugi daya aktif pada saluran
Q_{loss_n}	Rugi daya reaktif pada saluran
V_n	Tegangan pada bus ke - n
I_n	Arus pada saluran
r_n	Resistansi saluran ke – n
x_n	Reaktansi saluran ke – n
NB	Jumlah Bus
Z_{nm}	Impedansi saluran
ΔV	Drop tegangan
Q_{cap_i}	Injek daya reaktif kapasitor pada bus ke – i
TP_n	Total daya aktif sistem
QP_n	Total daya reaktif sistem

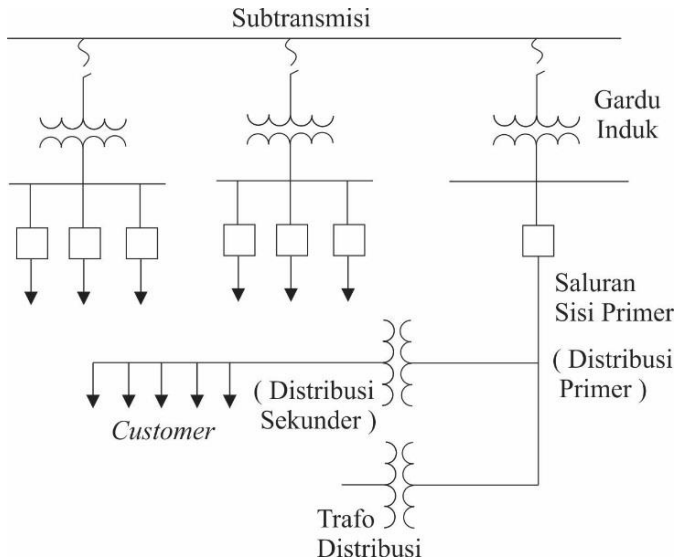
BAB II

TEORI PENUNJANG

2.1 Jaringan Distribusi Tenaga Listrik Radial

Jaringan distribusi merupakan jaringan listrik yang digunakan untuk menyalurkan energi listrik ke konsumen. Di Indonesia, jaringan distribusi terbagi menjadi jaringan dengan tegangan menengah, atau disebut dengan distribusi primer, dengan level tegangan menengah sebesar 20 kV, serta jaringan dengan tegangan rendah, atau disebut dengan distribusi sekunder, dengan level tegangan sebesar 380/220 V. Berdasarkan bentuk topologi jaringan, secara umum jaringan distribusi terbagi menjadi dua, yaitu bentuk *loop* dan *radial*. Pada Gambar 2.1 terlihat sebuah jaringan distribusi *radial* yang mempunyai ciri diagram satu garis dari jaringan distribusi. Keandalan jaringan distribusi *radial* lebih rendah dari pada jaringan distribusi *loop* [6].

Untuk detailnya mengenai gambaran jaringan distribusi *radial* ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Saluran distribusi *radial* [6]

2.2 Klasifikasi Beban

2.2.1 Klasifikasi Jenis Beban [2]

Pihak penyedia listrik mensuplai energi listrik kepada konsumen yang memiliki beragam penggunaan, misalnya industri, rumah sakit, perumahan dan lain sebagainya. Oleh sebab itu, beban-beban tersebut memiliki karakteristik pola operasi yang berbeda-beda.

Setiap pengelompokan beban tentu memiliki hal yang harus mendasarinya agar tidak membingungkan. Pengelompokan beban tersebut tentunya juga memiliki tujuan tersendiri sesuai kebutuhan pihak penyedia listrik. Setiap wilayah mengelompokkan beban sesuai kebutuhan mereka masing-masing.

Tugas Akhir ini menggunakan sistem pengelompokan beban yang digunakan PT. PLN selaku pihak penyedia listrik di Indonesia. PT. PLN Persero mengelompokkan beban ke dalam 4 jenis diantaranya :

1. Industrial

Beban industrial terdiri dari pemakai listrik yang memang khusus untuk menjalankan suatu usaha yang selalu membutuhkan energi listrik secara kontinyu tidak boleh terputus.

2. Residensial

Beban residensial terdiri atas pemakai listrik untuk kehidupan rumah tangga pada umumnya atau perumahan.

3. Komersial

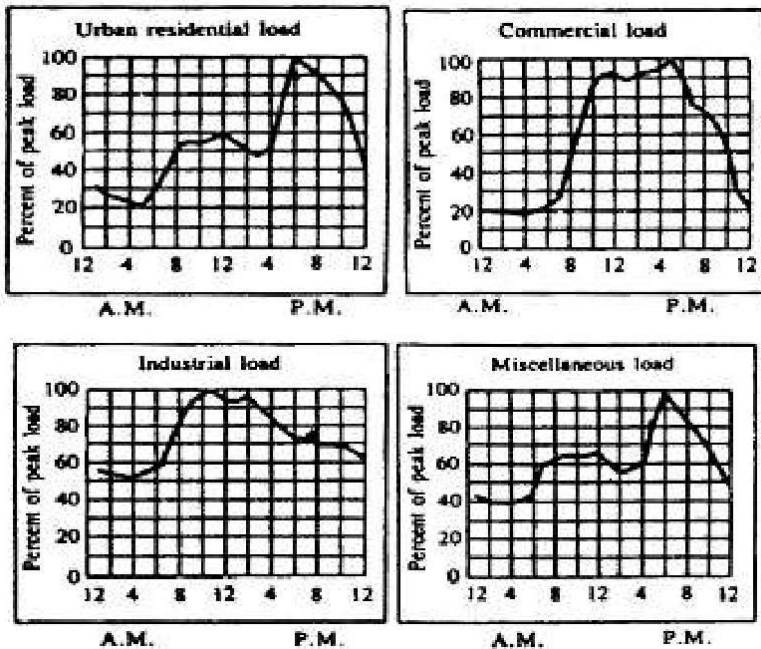
Beban komersial adalah pemakaian listrik yang di tujuhan untuk penunjang usaha bukan untuk menjalankan usaha yaitu seperti perkantoran, hotel, tempat penginapan, mall, pasar, tempat hiburan dan lain sebagainya yang mana tidak selalu membuthkan suplai tanpa henti.

4. Publik

Beban publik adalah pemakaian listrik untuk fasilitas-fasilitas umum seperti halnya stasiun kereta api, rumah sakit, bandara, kantor pemerintahan, penerangan jalan umum (PJU), sarana transportasi, markas militer dan lain sebagainya.

2.2.2 Karakteristik Beban [7]

Pengukuran tiap jam selama 24 jam pada berbagai jenis beban akan mendapatkan bentuk kurva (load curve) yang berbeda-beda sesuai jenis beban. Masing-masing kurva beban memiliki bentuk yang khas seperti pada Gambar 2.2. Kurva tersebut menunjukkan varias pembebanan selama 24 jam.

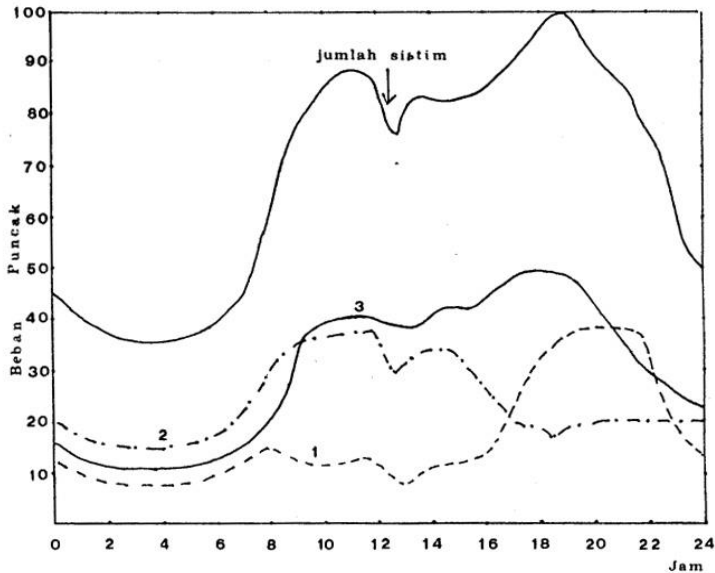


Gambar 2.2 Kurva beban harian masing-masing jenis beban [7]

Dalam banyak hal biasanya dilakukan pengukuran beban tiap jam selama 24 jam sehingga didapatkan kurva beban harian. Selain itu juga biasanya dipakai kurva beban bulanan dan kurva beban tahunan. Maksud dari analisa kurva beban antara lain :

1. Digunakan untuk menentukan macam-macam beban atas dasar sifat pemakaiannya.
2. Digunakan untuk menentukan ekonomis dari suatu sistem tenaga listrik dan pertimbangan-pertimbangan ekonomis pembangkitan.

Dengan menganalisa kurva beban akan dapat diperoleh kesimpulan yang berguna dalam hal menentukan berapa daya/energi (kW/kWh) yang harus dibangkitkan tiap bulan atau tiap tahun. Berikut contoh kurva harian untuk beberapa jenis beban [8].



Gambar 2.3 Karakteristik beban untuk residensial, komersial, dan industri [8]

Dari Gambar 2.3 dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Beban perumahan mencapai maksimum sekitar jam 18.00 sampai jam 22.00 (grafik nomor 1)
- Beban industri (grafik nomor 2) mencapai maksimum pada siang hari. Sedangkan untuk industri yang beroperasi siang dan malam akan mempunyai bentuk kurva beban yang cukup seimbang antara siang dan malam.
- Beban komersial (grafik nomor 3) mencapai maksimum pada sore hari sekitar jam 17.00 sampai jam 19.00.
- Selama sehari semalam ternyata sistem tersebut mencapai maksimum di dua tempat, yaitu siang hari dan malam hari. Beban puncak pada siang hari terjadi pada jam 10.00-12.00 dan beban puncak pada malam hari terjadi pada jam 18.30-20.00.
- Secara total keseluruhan beban puncak pada malam hari lebih besar dari pada beban puncak pada siang hari. Beban puncak malam hari sebagian besar dipakai oleh beban perumahan dan

komersial. Hal ini mungkin disebabkan karena pola pemakaian tenaga listrik untuk keperluan konsumtif yang terjadi pada malam hari, seperti penerangan jalan, penerangan rumah, dan lain sebagainya. Sedangkan untuk beban puncak pada siang hari diperkirakan digunakan oleh kelompok beban industri serta sebagian kelompok beban komersial dan sedikit kelompok beban perumahan. Pada umumnya kegiatan industri lebih besar pada siang hari walaupun ada beberapa jenis industri bekerja pada siang maupun malam hari. Meskipun demikian beban puncak siang hari untuk kelompok beban industri diperkirakan masih lebih besar dari pada beban puncak malam hari.

Ada tiga faktor utama yang mempengaruhi besar-kecilnya permintaan maksimum energi listrik, antara lain :

1. Alam/cuaca

Merupakan faktor yang paling sering (terjadi setiap tahun). Bila musim dingin tiba maka beban untuk pemanas ruangan akan sering bekerja sehingga permintaan energi akan naik. Begitu pula sebaliknya.

2. Acara/kegiatan tertentu

Merupakan faktor yang paling tajam dan mungkin durasinya paling pendek yang menghasilkan permintaan energi yang besar dalam jangka waktu sementara saat acara/kegiatan tersebut berlangsung. Misalnya kegiatan festival/perayaan, peringatan hari-hari besar, dan lain sebagainya.

3. Kondisi perekonomian/bisnis

Merupakan faktor terbesar dan sangat berpengaruh pada semua bidang. Perubahan kondisi perekonomian akan mempengaruhi permintaan energi oleh industri dan konsumsi secara signifikan. Perubahan kondisi ekonomi juga dapat mempengaruhi permintaan energi oleh beban residensial dan komersial.

2.3 Estimasi Kurva Beban Harian

2.3.1 Kurva Beban Harian Trafo Distribusi [2]

Untuk melakukan proses estimasi pembentukan kurva beban harian secara total suatu penyulang diawali dengan menentukan terlebih dahulu kurva beban harian tiap trafo distribusi. Kurva beban pada tiap trafo ini dapat dibentuk berdasarkan data pengukuran, data prosentase pelanggan tiap jenis beban pada setiap trafo serta database beban harian tiap jenis

beban. Telah dijelaskan sebelumnya bahwa data pengukuran tiap trafo antara lain terdiri atas besarnya daya yang diukur dengan dilengkapi data tentang rating trafo dan waktu dilakukannya pengukuran. Besar daya yang diukur akan menentukan prosentase pembebanan trafo tersebut saat pengukuran. Data pelanggan berisi tentang prosentase tiap jenis beban yang disuplai oleh trafo tersebut. Sedangkan database pembebanan dan database faktor daya digunakan sebagai referensi untuk menentukan besarnya pembebanan pada waktu-waktu yang lain. Estimasi pembebanan jenis beban residensial dinyatakan dengan persamaan 2.1 berikut ini.

$$Pn_{res} = \left(\frac{Pn_{ref_res}}{P_{ref_res}} \right) \cdot (kVA_{rated} \cdot lf \cdot lc_{res} \cdot pfn_{ref_res}) \quad (2.1)$$

Dimana :

$$n = 1, 2, 3, \dots, 24$$

Untuk estimasi pembebanan jenis beban komersial, publik, dan industri dihitung dengan menggunakan persamaan seperti di atas. Hanya saja yang berbeda adalah referensi daya, referensi faktor daya, dan komposisi beban menyesuaikan jenis beban yang akan diestimasi.

Jika masing-masing jenis beban sudah dihitung pada setiap jamnya (jam 1 - 24) maka nilai pembebanan pada semua jenis beban ditotal pada jam yang sama, sehingga didapatkan nilai pembebanan pada trafo tersebut selama 24 jam. Proses yang sama juga dilakukan pada semua trafo. Penjumlahan nilai pembebanan masing-masing jenis beban pada setiap jam dapat dinyatakan dengan persamaan 2.2 berikut ini.

$$Pn_{total_trafo_loading} = Pn_{res} + Pn_{pub} + Pn_{com} + Pn_{ind} \quad (2.2)$$

Dimana

$$n = 1, 2, 3, \dots, 24$$

Jika nilai total pembebanan pada trafo tersebut diplot maka akan didapatkan kurva beban harian pada masing-masing trafo. Kurva beban harian pada setiap trafo mempunyai profil yang khas dan berbeda-beda pada setiap trafo, tergantung dari komposisi dan volume beban

yang disuplai oleh trafo tersebut. Misalnya, jika pada suatu trafo hanya menyuplai beban komersial saja ($I_{f_{com}} = 100\%$) maka profil kurva harian tersebut sama dengan kurva harian beban komersial yang digunakan sebagai database referensi, hanya saja volumenya yang berbeda. Akan tetapi bila suatu trafo menyuplai beban campuran (mix), misalkan beban residensial dengan beban komersial, maka profil kurva harian yang terbentuk sangat khas, artinya berbeda sama sekali dengan profil kurva harian yang digunakan sebagai database. Hal ini terjadi karena masing-masing jenis beban mempunyai kontribusi pembebanan dengan komposisi dan volume yang berbeda. Bila salah satu jenis beban mempunyai komposisi dan volume lebih dominan (jauh lebih besar) dari komposisi dan volume beban lain maka profil kurva harian trafo tersebut cenderung menyerupai kurva harian beban yang lebih dominan.

2.3.2 Kurva Total Beban Harian [2]

Setelah diperoleh kurva harian pada masing-masing trafo distribusi, maka jika beban seluruh trafo pada waktu yang sama dijumlahkan (mulai jam 1 sampai jam 24) maka akan diperoleh kurva total beban harian pada suatu penyulang. Hal ini dapat dinyatakan dengan persamaan 2.3 berikut.

$$Pn_{total_penyulang} = \frac{\sum_{m=1}^{jum_trafo} Pn_m}{1000} \text{ (MW)} \quad (2.3)$$

Dimana $n = 1, 2, 3, \dots, 24$ dan $m =$ banyaknya trafo dalam penyulang tersebut

Nilai daya pada kurva ini merupakan daya murni yang dipakai oleh beban konsumen tanpa rugi-rugi di jaringan. Secara profil, bentuk kurva total ini identik dengan bentuk kurva hasil pengukuran beban penyulang di gardu induk. Akan tetapi secara volume (nilai daya) pada tiap-tiap komponen waktu tidaklah sama karena rugi-rugi di jaringan belum terhitung.

2.3.3 Kerugian Daya pada Transformator [9]

Kerugian daya yang terjadi pada transformator dapat di klasifikasikan menjadi dua yaitu kerugian daya tanpa beban (*No Load*

Losses) dan kerugian daya berbeban (*Load Losses*). Kerugian daya tanpa beban pasti memiliki nilai yang selalu tetap, sedangkan nilai kerugian daya kondisi berbeban akan memiliki nilai yang berubah-ubah sesuai kondisi pembebanan trafo. Data yang didapat dari datasheet trafo adalah kVA, No-Load Losses, dan Rated Load Losses. Sehingga kerugian daya berbeban dicari dengan persamaan 2.4 [11] berikut :

$$kW_{loss-trf-L} = \left[\frac{kVA_{load}}{kVA_{rated}} \right]^2 \times kW_{loss-R} \quad (2.4)$$

Kemudian dapat di ketahui total kerugian yang terjadi pada trafo adalah sebagai berikut :

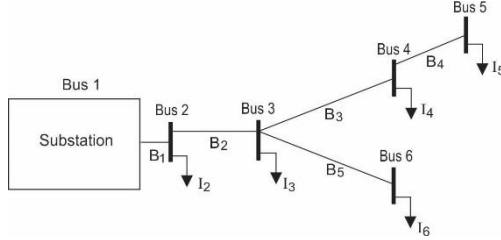
$$kW_{loss-trf-T} = kW_{loss-trf-L} + kW_{loss-trf-NL} \quad (2.5)$$

2.4 Analisis Aliran Daya

Studi aliran daya (*loadflow*) adalah tahap awal yang diperlukan untuk melakukan analisis dan perencanaan sebuah sistem tenaga listrik, untuk pengembangan dan operasi sistem tenaga listrik, serta untuk penjadwalan pembangkit. Studi aliran daya secara umum terdiri dari beberapa metode, seperti Gauss-Seidel, Newton Raphson, Fast Decouple dan metode lainnya [10]. Pada penelitian tugas akhir ini, analisis aliran daya yang digunakan adalah metode *Topology Network*.

2.4.1 Metode *Topology Network*

Metode *Topology network* merupakan salah satu metode analisis aliran daya listrik yang menggunakan pemodelan dengan membentuk topologi jaringan menjadi bentuk persamaan matematika. Kemudian dalam penyelesaiannya, persamaan matematika tersebut dihitung dan diiterasi sehingga diperoleh nilai arus, tegangan, rugi – rugi daya dan total daya pembangkitan pada sistem. Analisis aliran daya dengan metode *topology network* sangat cocok untuk diterapkan pada jaringan tenaga listrik dengan topologi jaringan radial [11]. Gambar 2.4 berikut menunjukkan sebuah contoh sistem radial.



Gambar 2.4 Contoh single line diagram jaringan radial [11]

Langkah pertama yang harus dilakukan adalah menghitung besar arus yang mengalir pada saluran. Kemudian dimodelkan dalam bentuk matriks BIBC (*Bus Injection to Branch Current*). Besar arus saluran dapat ditulis dalam persamaan sebagai berikut:

$$I_n = \left(\frac{P_n + jQ_n}{V_n} \right)^* \quad (2.6)$$

Berdasarkan hukum persamaan arus *Kirchoff* yang diterapkan pada jaringan Gambar 2.4, arus yang masuk pada setiap bus dapat dimodelkan dalam bentuk fungsi matriks. Saluran pada jaringan dimodelkan dengan variabel $B_1 - B_5$. Berikut hasil pemodelannya dalam bentuk matriks [11].

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Sehingga, dari matriks di atas dapat dibuat sebuah persamaan yang lebih sederhana dan dapat ditulis sebagai berikut

$$[B] = [BIBC][I] \quad (2.8)$$

Kemudian, untuk hubungan antara arus pada saluran dan tegangan dapat dirumuskan melalui persamaan berikut :

$$V_2 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} \quad (2.9)$$

$$V_3 = V_2 - B_2 \cdot Z_{23} \quad (2.10)$$

$$V_4 = V_3 - B_3 \cdot Z_{34} \quad (2.11)$$

Variabel Z_{12} , Z_{23} , Z_{34} merupakan impedansi saluran dari antara bus 1 dengan bus 2, bus 2 dengan bus 3, dan bus 3 dengan bus 4. Melalui perhitungan dengan substitusi persamaan (2.9) dan (2.10) pada persamaan (2.11), maka tegangan pada bus 4 dapat dirumuskan menjadi sebagai berikut :

$$V_4 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} \quad (2.12)$$

Kemudian, tegangan pada setiap bus dapat dirumuskan dalam sebuah fungsi matriks dari BIBC, sehingga diperoleh matriks baru yaitu matriks BCBV (*Branch Current to Branch Voltage*) dengan menerapkan cara yang sama pada persamaan (2.12). Berikut matriks BCBV dirumuskan pada persamaan (2.13) :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Sehingga berdasarkan matriks tersebut dapat dirumuskan persamaan yang lebih sederhana yaitu sebagai berikut

$$[\Delta V] = [BCBV][B] \quad (2.14)$$

Melalui perhitungan substitusi persamaan (2.7) ke persamaan (2.14) maka dapat diperoleh nilai ΔV yang ditunjukkan pada persamaan (2.15) dan dapat disederhanakan menjadi persamaan (2.16).

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] \quad (2.15)$$

$$[\Delta V] = [DLF][I] \quad (2.16)$$

variabel $[DLF] = [BCBV][BIBC]$, sehingga

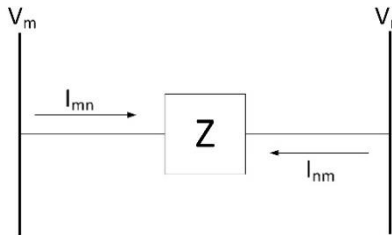
$$[\Delta V^{k+1}] = [DLF][I^k] \quad (2.17)$$

$$[V]^{k+1} = [V_1] - [\Delta V^{k+1}] \quad (2.18)$$

V_1 adalah tegangan dari sumber (*Swing bus*), sehingga dari persamaan (2.17) dapat diperoleh nilai deviasi tegangan pada setiap bus. Pada setiap iterasi kemudian nilai tersebut diperbarui dengan nilai dari persamaan (2.18), sehingga diperoleh nilai tegangan yang valid setelah iterasi menjadi konvergen [11].

2.5 Rugi-rugi Daya Listrik

Rugi-rugi daya listrik pada setiap saluran dapat dihitung berdasarkan nilai tegangan dan arus pada setiap bus dan saluran yang telah diperoleh melalui perhitungan iterasi. Pada gambar 2.5 diilustrasikan sebuah saluran yang menghubungkan dua bus, yaitu bus m dan bus n. Arus saluran I_{mn} terukur pada bus m didefinisikan positif, sedangkan arus saluran I_{nm} dari bus n didefinisikan negatif karena berasal dari arah yang berlawanan [10].



Gambar 2.5 Ilustrasi saluran sederhana

Untuk arus saluran $m \rightarrow n$ dapat ditulis :

$$I_{mn} = I_m = Z_{mn}(V_m - V_n) \quad (2.19)$$

dan untuk saluran $n \rightarrow m$ dapat ditulis menjadi :

$$I_{nm} = -I_m = Z_{nm}(V_n - V_m) \quad (2.20)$$

Sehingga dapat dihitung daya kompleks untuk bus m ke n dan bus n ke bus m sebagai berikut

$$S_{mn} = V_m * I_{mn}^* \quad (2.21)$$

$$S_{nm} = V_n * I_{nm}^* \quad (2.22)$$

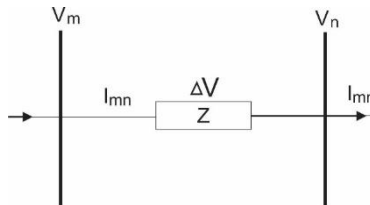
Rugi saluran dalam saluran $m - n$ diperoleh dengan penjumlahan persamaan (2.21) dan (2.22) sebagai berikut

$$S_{l\,mn} = S_{mn} + S_{nm} \quad (2.23)$$

$$P_{l\,mn} = \text{real} (S_{l\,mn}) \quad (2.24)$$

2.6 Deviasi Tegangan [10]

Deviasi tegangan merupakan rugi-rugi jaringan dalam bentuk *drop* tegangan yang dapat dimodelkan dengan ilustrasi saluran sederhana pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Ilustrasi saluran sederhana

Dengan mengacu pada hukum *Kirchoff* untuk persamaan tegangan pada sebuah rangkaian maka diperoleh persamaan (2.25).

$$V_m = V_n + \Delta V = V_n + Z * I_{mn} \quad (2.25)$$

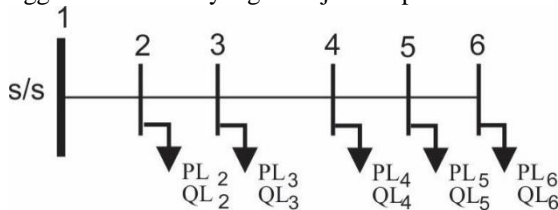
2.7 Metode Analitis

Pada penelitian tugas akhir ini dilakukan penentuan lokasi penempatan dan kapasitas optimal *capacitor bank* menggunakan metode analitis. Metode analitis bekerja berdasarkan pemodelan suatu sistem atau obyek dalam bentuk persamaan matematika. Melalui persamaan matematika tersebut dapat dilakukan analisis lebih lanjut mengenai sistem yang dimodelkan, seperti optimalisasi system, estimasi keadaan sistem, hingga perencanaan untuk pengembangan sistem dapat dianalisis melalui metode analitis yang digunakan [12].

Pada penerapan untuk penentuan lokasi penempatan dan kapasitas optimal pemasangan *capacitor bank* dengan mempertimbangkan rugi-rugi daya pada jaringan, metode analitis ini menggunakan turunan pertama dari persamaan matematika. Selain itu, metode analitis memiliki keunggulan karena dikembangkan berdasarkan persamaan matematis baru yang diharapkan mampu memberikan hasil yang lebih ilmiah, komperhensif, dan lebih akurat [3] dalam pengimplementasiannya, sehingga dapat juga diterapkan untuk jaringan besar. Berikut penjelasan lebih lanjut mengenai penerapan metode analitis.

2.7.1 Penentuan Kapasitas Optimal *Capacitor Bank*

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai metode penentuan kapasitas optimal *capacitor bank* pada suatu sistem distribusi radial dengan menggunakan sistem yang ditunjukkan pada Gambar 2.7



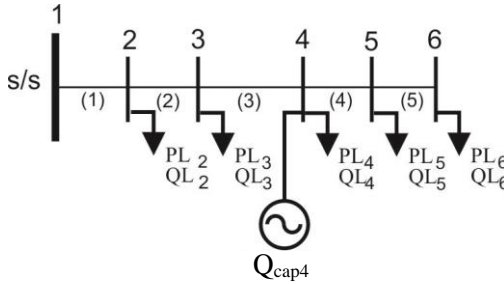
Gambar 2.7 Ilustrasi Sederhana Sistem Radial [3]

Berdasarkan ilustrasi model sistem distribusi radial di atas dapat dimodelkan dalam bentuk persamaan matematika sederhana, yang dirumuskan pada persamaan (2.26) dan (2.27) [3].

$$P_n = \sum_i^{NB} PL_i + \sum_i^{NB-1} Ploss'_i \quad (2.26)$$

$$Q_n = \sum_i^{NB} QL_i + \sum_i^{NB-1} Qloss'_i \quad (2.27)$$

Mengacu pada persamaan tersebut, maka dapat diketahui bahwa daya aktif dan reaktif total dalam sebuah sistem adalah total pembebanan dan rugi – rugi daya pada jaringan. Selanjutnya, ketika pada bus 4 dipasang sebuah *capacitor bank* yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Sistem radial yang terpasang *capacitor bank*

Sehingga sesuai dengan konsep gambar diatas diperoleh persamaan (2.28) dan (2.29) sebagai berikut [3].

$$TP_2 = [\sum_{i=2}^{NB=6} PL_i + \sum_{i=2}^{NB-1} Ploss'_i] \quad (2.28)$$

$$TQ_2 = [\sum_{i=2}^{NB=6} QL_i + \sum_{i=2}^{NB-1} Qloss'_i] - Q_{cap4} \quad (2.29)$$

Berdasarkan persamaan matematika di atas, dapat diketahui bahwa pengaruh pemasangan *capacitor bank* pada bus 4 pada sistem hanya akan mengurangi rugi – rugi daya pada bus 2, 3 dan 4, yang artinya hanya menurunkan nilai arus yang melalui bus 2, 3, dan 4. Pada bus 5 dan 6 nilai rugi – rugi daya pada jaringan bernilai sama. Hal ini disebabkan karena nilai arus yang melalui saluran pada bus 5 dan 6 bernilai sama seperti kondisi keadaan sebelum pemasangan *capacitor bank*. Dari persamaan nilai total daya aktif (2.28) dan reaktif (2.29) dapat dihitung nilai arus total yang melalui saluran pada bus ke – n. Berikut persamaan matematika yang ditunjukkan pada persamaan (2.30) - (2.32) [3].

$$I_n = \left[\frac{TP_n^2 + jTQ_n^2}{V_n^2} \right] \quad (2.30)$$

$$Ploss_n = I_n^2 r_n \quad (2.31)$$

$$Ploss_n = r_n \left[\frac{TP_n^2 + jTQ_n^2}{V_n^2} \right] \quad (2.32)$$

Karena jumlah saluran = jumlah bus – 1, maka persamaan (2.32) ditulis menjadi persamaan (2.33) sebagai berikut :

$$Ploss_{n-1} = r_{n-1} \left[\frac{TP_n^2 + jTQ_n^2}{V_n^2} \right] \quad (2.33)$$

Sehingga dari persamaan diatas, dengan menjumlah seluruh total P_{loss} maka diperoleh persamaan (2.34), yang menjelaskan nilai total P_{loss} dari sebuah sistem tenaga listrik.

$$TPloss = \sum_{n=2}^{NB} r_{n-1} \left[\frac{TP_n^2 + jTQ_n^2}{V_n^2} \right] \quad (2.34)$$

Secara sederhana persamaan TP_n dan TQ_n dapat ditulis menjadi persamaan dibawah ini.

$$TP_n = P_n \quad (2.35)$$

$$TQ_n = Q_n - Q_{capi} \quad (2.36)$$

Persamaan (2.35) dan (2.36) dapat disubstitusikan ke dalam persamaan (2.34) sehingga diperoleh persamaan (2.37).

$$TPloss_{cap} = \sum_{n=2}^i \frac{r_{n-1}}{V_n^2} \left[(P_n)^2 + (Q_n - Q_{capi})^2 \right] + \sum_{n=1+1}^{NB} \frac{r_{n-1}}{V_n^2} [P_n^2 + Q_n^2] \quad (2.37)$$

Setelah didapatkan persamaan *total power loss* pada persamaan (2.37), maka dapat diperoleh persamaan (2.39) untuk menentukan kapasitas *capacitor bank* yang optimal dengan metode

mendiferensialkan persamaan (2.37) terhadap ukuran *capacitor bank* (Q_{capi}). Berikut penurunan persamaan (2.37) hingga diperoleh persamaan penentuan kapasitas optimal *capacitor bank* pada persamaan (2.39) .

$$\frac{\partial TP_{loss_{cap}}}{\partial Q_{capi}} = 0 \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial \left(\sum_{n=2}^i \frac{r_{n-1}}{V_n^2} \left[(P_n)^2 + (Q_n - Q_{capi})^2 \right] + \sum_{n=i+1}^{NB} \frac{r_{n-1}}{V_n^2} [P_n^2 + Q_n^2] \right)}{\partial (Q_{capi})} = 0$$

$$\frac{\partial \left(\sum_{n=2}^i \frac{r_{n-1}}{V_n^2} \left[(P_n)^2 + (Q_n - Q_{capi})^2 - 2 Q_n Q_{capi} \right] + \sum_{n=i+1}^{NB} \frac{r_{n-1}}{V_n^2} [P_n^2 + Q_n^2] \right)}{\partial (Q_{capi})} = 0$$

$$2 \sum_{n=2}^i \frac{r_{n-1}}{V_n^2} (Q_{capi}) - 2 \sum_{n=2}^i \frac{r_{n-1}}{V_n^2} (Q_n) = 0$$

$$2 \sum_{n=2}^i \frac{r_{n-1}}{V_n^2} (Q_{capi}) = 2 \sum_{n=2}^i \frac{r_{n-1}}{V_n^2} (Q_n)$$

$$Q_{capi} = \frac{\sum_{n=2}^i \frac{r_{n-1}}{V_n^2} (Q_n)}{\sum_{n=2}^i \frac{r_{n-1}}{V_n^2}} \quad (2.39)$$

Berdasarkan persamaan (2.37) dan (2.38) dapat dipahami bahwa fungsi obyektif dari persamaan tersebut adalah rugi – rugi daya aktif (P_{loss}) pada jaringan, sehingga penentuan kapasitas optimal

capacitor bank pada suatu bus ditujukan untuk memperoleh P_{loss} yang minimal pada sistem. Selain itu, dengan adanya pemasangan *capacitor bank* pada jaringan diharapkan juga menurunkan nilai *drop* tegangan yang terjadi pada jaringan.

2.7.2 Penentuan Lokasi Capacitor Bank

Penentuan lokasi penempatan *capacitor bank* dapat dilakukan setelah semua bus pada jaringan memperoleh kapasitas pemasangan *capacitor bank* yang optimal.

Penentuan lokasi *capacitor bank* dilakukan dengan perhitungan nilai TP_{loss} menggunakan persamaan (2.37), sehingga diperoleh lokasi dan kapasitas optimal dari *capacitor bank* yang selanjutnya dilakukan pemasangan *capacitor bank* pada lokasi tersebut [3].

Parameter tambahan berupa profil tegangan pada setiap bus juga perlu dianalisis dan dievaluasi menggunakan analisis aliran daya. Jika hasil profil tegangan belum memenuhi *constraint* yang telah ditentukan maka dipilih ranking dan akan dilakukan penempatan *capacitor bank* berikutnya sampai diperoleh profil tegangan yang memenuhi *constraint*.

2.8 Kapasitor [13]

Kabel dalam sistem tenaga listrik berfungsi sebagai penghantar listrik. Kabel pada saluran memiliki sifat induktansi yang apabila ukurannya semakin panjang mengakibatkan semakin besarnya sifat induktansi yang timbul pada penghantar tersebut. Apabila sebuah jaringan tidak memiliki daya reaktif di daerah dekat dengan beban, maka akan ada arus reaktif yang mengalir pada jaringan. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya penurunan power factor, peningkatan rugi-rugi jaringan, dan penurunan tegangan, utamanya terjadi pada ujung saluran.

Salah satu metode untuk mengurangi dampak buruk dari mengalirnya arus reaktif ini adalah dengan melakukan kompensasi daya reaktif pada jaringan dan menjaga profil tegangan selalu berada pada batas yang diizinkan. Kapasitor dapat digunakan sebagai sumber daya reaktif tambahan untuk kompensator akibat pembebanan tersebut. *Capacitor bank* merupakan peralatan yang digunakan untuk memperbaiki kualitas daya pada sistem. Kapasitor sebagai pengompensasi daya reaktif dipasang secara paralel pada jaringan.

Beberapa manfaat dalam pemasangan *capacitor bank* adalah:

1. Perbaikan faktor daya
2. Penurunan arus total
3. Penurunan tegangan drop
4. Peningkatan daya yang tersedia
5. Penurunan rugi-rugi

Pada rentang frekuensi 50 atau 60 Hz terdapat 3 jenis kapasitor daya, yaitu kapasitor seri, shunt, dan penyalap. Jenis kapasitor yang digunakan untuk mengkompensasi beban induktif dan untuk pengaturan tegangan ujung transmisi adalah kapasitor shunt. Pada kapasitor shunt, daya reaktif sebanding dengan kuadrat tegangan. Pemasangan kapasitor secara parallel pada jaringan dapat membangkitkan daya reaktif negative, sedangkan beban membangkitkan daya reaktif positif. Jika tegangan sisi beban ingin dipertahankan konstan, maka dengan menggunakan kapasitor shunt, arus reaktif yang mengalir pada saluran akan berkurang. Apabila arus reaktif yang mengalir pada saluran berkurang, maka penurunan tegangan yang terjadi pada saluran berkurang.

2.9 Load Factor dan Loss Factor [14]

Load factor adalah koefisien yang didapatkan dengan membandingkan pembebanan rata-rata terhadap pembebanan waktu puncak pada periode tertentu [14]. Apabila faktor daya dianggap selalu konstan maka load factor dapat dijelaskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$F_d = \frac{\int_0^T S \cdot dt}{T \cdot S_{max}} \quad (2.40)$$

Sedangkan *Loss Factor* didefinisikan sebagai kerugian daya rata-rata dibandingkan terhadap kerugian daya ketika beban puncak yang terjadi selama periode tertentu [14]. Persamaan loss factor dapat dijelaskan dengan persamaan berikut :

$$F_s = \frac{\int_0^T P_{load \ loss} \cdot dt}{T \cdot P_{max \ load \ loss}} \quad (2.41)$$

Hubungan antara *Load Factor* dengan *Loss Factor* dapat ditemukan menggunakan rumus dalam bentuk polinomial dan eksponensial. Persamaan dalam bentuk polinomial yang menyatakan hubungan keduanya dijelaskan sebagai berikut :

$$F_s = A \cdot F_d + B \cdot F_d^2 + C \cdot F_d^2 \quad (2.42)$$

dimana parameter A, B, dan C harus memiliki nilai total sama dengan satu. Sedangkan persamaan dalam bentuk eksponensial dijelaskan sebagai berikut :

$$F_s = F_d^D \quad (2.43)$$

dimana nilai D harus berada pada nilai antara 1 dan 2. Kedua persyaratan tersebut menunjukkan bahwa ketika *Load Factor* bernilai nol maka *Loss Factor* juga bernilai nol dan ketika *Load Factor* bernilai satu maka *Loss Factor* bernilai satu.

Beberapa formula untuk menghitung nilai *loss factor* pernah dirumuskan pada penelitian-penelitian sebelumnya. Penamaan formula-formula ini disesuaikan dengan nama-nama penemu masing-masing formula. Tabel 2.1 akan menjelaskan formula-formula *loss factor* tersebut.

Tabel 2.1 Kumpulan Formula *Loss Factor* [14]

No	Fs =	Penemu
1	$0,3 * Fd + 0,7 * Fd^2$	Buller
2	$0,2 * Fd + 0,8 * Fd^2$	CitiPower
3	$0,15 * Fd + 0,85 * Fd^2$	Gangel
4	$0,083 * Fd + 1,036 * Fd^2 - 0,119 * Fd$	Wolf
5	$0,08 * Fd + 0,92 * Fd^2$	Gustafson I
6	$Fd^{1,8}$	Junge
7	$Fd^{1,912}$	Gustafson II
8	$\frac{Fd^2 * (2 + Fd^2)}{1 + (2 * Fd)}$	Sochinsky
9	$Fd^2 + 0,273 * (Fd - \frac{S_{min}}{S_{max}})$	Dewberry

2.10 Estimasi Kerugian Energi [4]

Proses perhitungan estimasi kerugian energi pada jaringan distribusi radial dimulai dengan menghitung *Load Factor*. Setelah ditemukan nilai *Load Factor* pada jaringan, selanjutnya dapat dilakukan perhitungan untuk menemukan nilai *Loss Factor*.

Kerugian energi selama satu tahun dapat diestimasi melalui persamaan berikut :

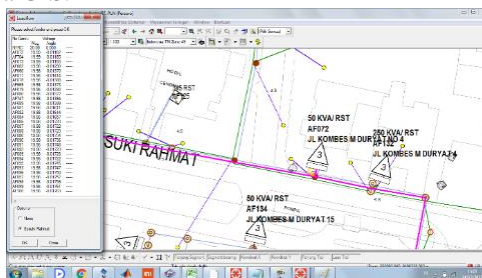
$$E_{loss-T} = E_{loss-load} + E_{loss-no\ load} \quad (2.44)$$

$$E_{loss-T} = (H \times 24 \times P_{\max\ load\ loss} \times F_s) + (H \times 24 \times P_{no\ load}) \quad (2.45)$$

2.11 Geographical Information System (GIS)

Geographic Information System atau biasa disingkat dengan sebutan GIS merupakan sebuah perangkat lunak yang berfungsi untuk melakukan pemetaan dan analisis yang sesuai dengan kondisi geografis bumi. Perangkat lunak GIS secara umum terintegrasi dengan sebuah sistem database, seperti data obyek yang divisualisasikan pada sebuah peta sesuai dengan letak dan kondisi geografis.

GIS pada umumnya sering digunakan untuk memprediksi (*forecasting*), merencanakan (*planning*), memantau (*monitoring*), membantu dalam mengambil keputusan, serta memberikan solusi dari suatu permasalahan dari sebuah obyek [15]. Penggunaan GIS dapat membantu pekerjaan agar dapat terselesaikan dengan lebih cepat dan lebih baik apabila dibandingkan dengan menggunakan metode manual. GIS juga dapat digunakan untuk penerapan pada sistem tenaga listrik. Pada Gambar 2.7 ditunjukkan salah satu tampilan sistem kelistrikan kota Surabaya pada GIS.



Gambar 2.9 Contoh tampilan aplikasi GIS

BAB III

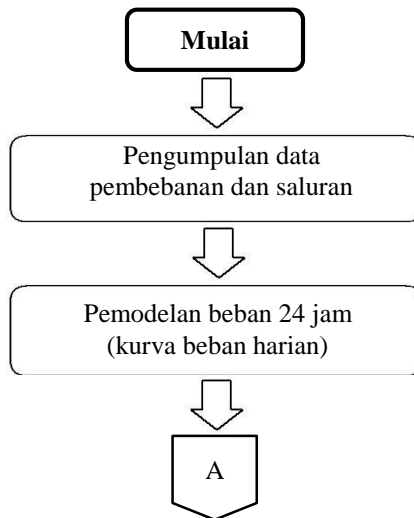
ESTIMASI KERUGIAN ENERGI SERTA PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS OPTIMAL CAPACITOR BANK

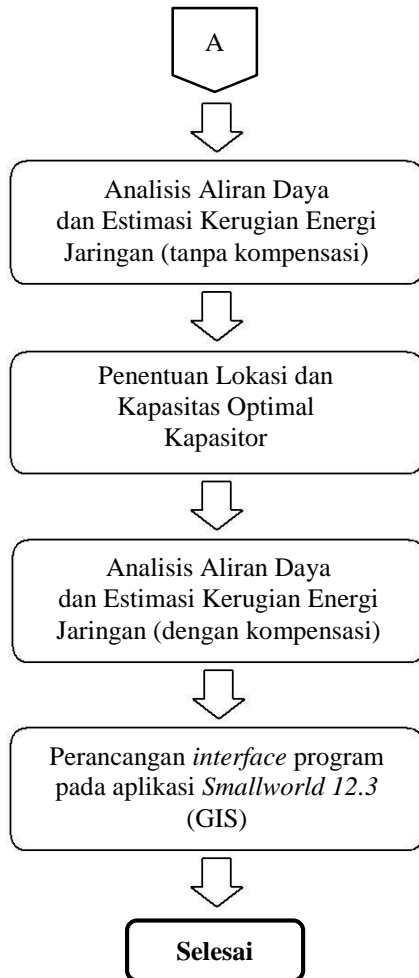
3.1 Konsep Dasar

Pada tugas akhir ini akan dilakukan estimasi kerugian energi pada jaringan distribusi radial. Estimasi kerugian energi akan dilakukan pada jaringan dengan membandingkan kerugian energi sebelum dan sesudah adanya pemasangan kapasitor pada jaringan. Estimasi kerugian energi dihitung berdasarkan metode *loss factor* dengan menggunakan beberapa formula yang telah ditemukan pada penelitian-penelitian sebelumnya, sehingga didapatkan formula yang sesuai dengan kondisi beban.

Pemasangan kapasitor pada jaringan dilakukan menggunakan metode analitis untuk mendapatkan lokasi dan kapasitas optimal *capacitor bank* yang harus dipasang pada jaringan.

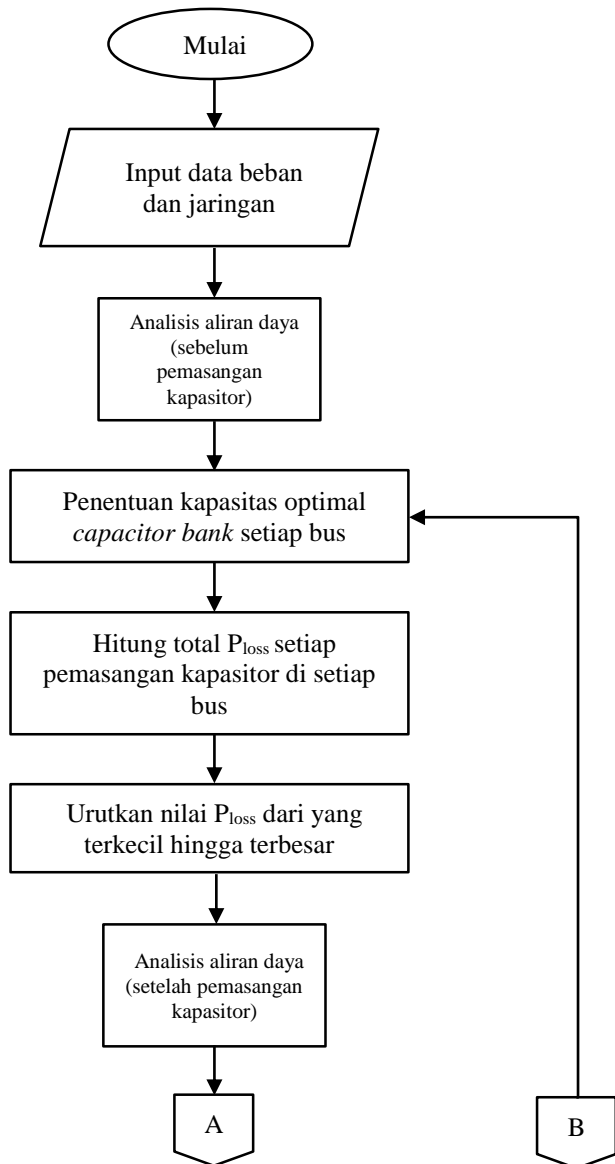
Berikut merupakan diagram alir pada penelitian ini :

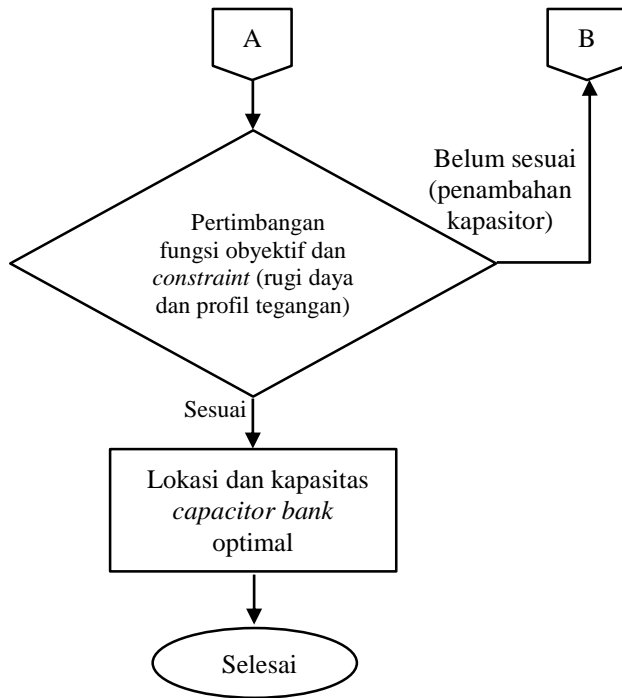




Gambar 3.1 Diagram alir metode penelitian

3.1.1 Optimisasi Lokasi dan Kapasitas *Capacitor Bank*





Gambar 3.2 Diagram alir proses optimisasi jaringan

- **Analisis aliran daya**

Pada tahap ini dilakukan analisis aliran daya untuk mengetahui kondisi awal dari sistem, sebelum dilakukan pengkondisian dengan memasang pada sistem, yang dilihat dari beberapa parameter seperti nilai tegangan, arus, aliran daya dari sumber ke beban, dan rugi – rugi pada jaringan. Nilai dari parameter-parameter ini yang akan digunakan untuk perhitungan dan penentuan lokasi dan kapasitas *capacitor bank*.

- **Penentuan lokasi dan kapasitas *capacitor bank***

Setelah mengetahui kondisi awal dari sistem, tahap selanjutnya adalah menentukan kapasitas optimal *capacitor bank* pada setiap bus selain bus sumber daya listrik atau generator. Dalam menentukan kapasitas *capacitor bank* yang optimal pada setiap bus, di analisis dengan

menggunakan sistem persamaan differensial, yang ditunjukkan pada persamaan (2.38) dan (2.39).

Perhitungan ini dilakukan sampai seluruh bus selain bus sumber atau generator memperoleh nilai kapasitas *capacitor bank* yang optimal. Penggunaan metode analitis menghasilkan hasil optimasi dengan proses lebih cepat, tepat, dan akurat jika dibandingkan dengan metode heuristic (kecerdasan buatan) karena pendekatan secara detail mengenai pemodelan sistem.

• Perhitungan total P_{loss}

Pada tahap selanjutnya adalah menentukan nilai P_{loss} dengan cara mengestimasi nilai P_{loss} pada setiap pemasangan *capacitor bank* yang optimal pada setiap bus, sehingga diperoleh nilai total rugi – rugi daya aktif setelah dipasang *capacitor bank* pada sistem ($TP_{losscap}$) berdasarkan persamaan (2.37).

Berdasarkan perhitungan akan diperoleh nilai $TP_{losscap}$ sebanyak jumlah bus selain bus sumber atau generator. Nilai $TP_{losscap}$ merupakan bukan merupakan nilai sebenarnya dari total rugi daya aktif setelah dipasang *capacitor bank* pada sistem, melainkan merupakan pendekatan nilai sebenarnya dari total rugi daya aktif setelah dipasang *capacitor bank* pada sistem, hal ini terjadi karena penentuan nilai total rugi daya aktif tersebut bukan diperoleh dari hasil analisis aliran daya tapi dari hasil estimasi $TP_{losscap}$ dengan persamaan (2.37). Tetapi, hal ini cukup akurat untuk menentukan total rugi daya aktif pada sistem setelah terpasang *capacitor bank* pada bus ke – n. Jika dibandingkan, penentuan total rugi daya aktif menggunakan aliran daya dengan penggunaan persamaan (2.37) akan lebih efektif dan cepat, karena tidak perlu melakukan analisis aliran daya sebanyak jumlah bus beban selain bus sumber.

• Penentuan lokasi *capacitor bank*

Pada tahap berikutnya adalah menentukan lokasi optimal dari pemasangan *capacitor bank*. Penentuan lokasi optimal dilakukan dengan mengurutkan nilai $TP_{losscap}$ dari nilai terkecil sampai terbesar, yang selanjutnya dipilih lokasi dengan kapasitas *capacitor bank* yang telah ditentukan pada tahap sebelumnya dengan nilai $TP_{losscap}$ yang paling minimal. Sehingga didapatkan lokasi pemasangan dan kapasitas *capacitor bank* yang optimal.

- **Analisis aliran daya (setelah kompensasi kapasitor)**

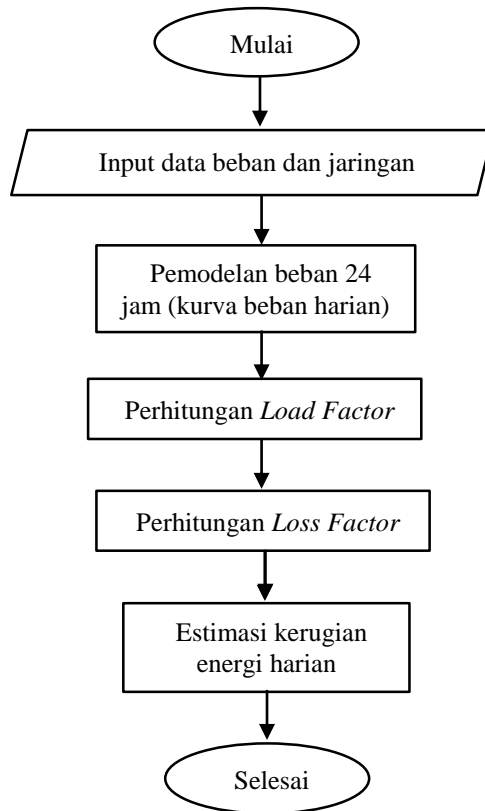
Aliran daya ini merupakan tahap akhir dalam metode penentuan lokasi dan kapasitas optimal *capacitor bank* yang berfungsi untuk mengetahui beberapa parameter seperti tegangan, arus, besar dan arah aliran daya serta rugi – rugi jaringan pada sistem setelah dipasang *capacitor bank*, yang selanjutnya dapat digunakan sebagai evaluasi dan pembandingan anantara kondisi awal sistem dan setelah pemasangan *capacitor bank* pada sistem. Dengan adanya pemasangan *capacitor bank* diharapkan mampu meningkatkan performa atau tingkat kualitas daya listrik pada sistem, khususnya menurunkan nilai rugi – rugi jaringan dan drop tegangan pada sistem.

Pada tugas akhir ini, parameter yang harus dipenuhi adalah parameter nilai tegangan yakni, $1.05 > \text{tegangan} > 0.95$ (dalam p.u) serta dengan nilai total rugi daya aktif pada jaringan yang paling minimal. Sesuai dengan diagram alir pada Gambar 3.2, jika pada pemasangan kapasitor yang pertama tidak memenuhi parameter tegangan atau belum memberikan penurunan rugi daya pada jaringan yang signifikan, maka dapat dilakukan pemasangan *capacitor bank* berikutnya, dengan menganggap pemasangan *capacitor bank* yang sebelumnya sebagai kondisi awal sistem serta mengulangi tahapan yang telah dilakukan.

Setelah parameter profil tegangan telah terpenuhi dan rugi daya pada sistem berada pada nilai yang minimum, maka hasil yang didapatkan merupakan hasil akhir dari penentuan lokasi dan kapasitas optimal *capacitor bank*.

3.1.2 Estimasi Kerugian Energi Jaringan

Estimasi kerugian energi harian yang terjadi pada jaringan dapat dilakukan dengan analisis aliran energi yang dilakukan perjam selama 24 kali. Namun hal ini akan memerlukan waktu yang cukup lama dan memerlukan data yang akurat. Sehingga pada tugas akhir ini akan dilakukan estimasi kerugian energi menggunakan metode *loss factor*. Hasil keduanya akan dibandingkan untuk mengetahui dan menentukan formula *loss factor* yang sesuai dengan kondisi beban yang digunakan.



Gambar 3.3 Diagram alir metode estimasi kerugian energi

Langkah awal yang harus dilakukan untuk melakukan estimasi kerugian energi adalah memodelkan beban harian selama 24 jam (membentuk kurva beban harian). Berdasarkan kurva tersebut, akan diperoleh data beban selama 24 jam beserta beban puncak harian. Perhitungan kerugian energi menggunakan analisis aliran energi dapat dilakukan dengan melakukan simulasi aliran daya selama 24 kali yang dilakukan berdasarkan beban per jam.

Sedangkan untuk perhitungan kerugian energi dengan estimasi berbasis *loss factor*, diawali dengan menghitung nilai *load factor* sesuai dengan persamaan (2.40) pada bab sebelumnya.

Kemudian nilai dari *load factor* yang diperoleh akan digunakan sebagai variabel perhitungan nilai *loss factor* sesuai dengan formula-formula yang telah dirumuskan pada Tabel 2.1.

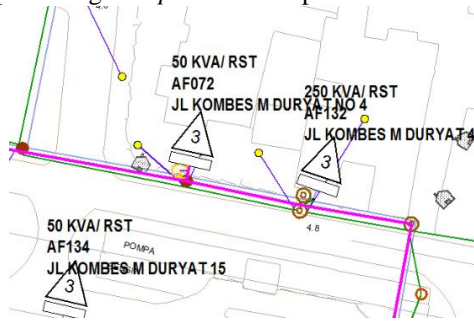
Berdasarkan formula-formula tersebut akan didapatkan nilai *loss factor* yang berbeda-beda pada masing-masing formula. Nilai-nilai *loss factor* ini yang akan digunakan untuk mengestimasi total kerugian energi pada jaringan sesuai dengan persamaan (2.45) pada bab 2.

Perhitungan kerugian energi yang didapatkan melalui metode *loss factor* akan dibandingkan dengan perhitungan manual melalui analisis aliran energi selama 24 jam. Hasil perbandingan tersebut akan menghasilkan besaran kesalahan perhitungan (error) dalam bentuk persen. Formula yang memiliki kesalahan perhitungan paling kecil diartikan sesuai untuk perhitungan dengan kondisi beban yang digunakan.

Selain itu, estimasi kerugian energi pada jaringan juga dilakukan dalam dua tahap. Pertama, yakni dilakukan ketika sistem dalam kondisi awal, tanpa kompensasi dari pemasangan *capacitor bank*. Kedua, kerugian energi akan dihitung kembali setelah adanya kompensasi dari pemasangan *capacitor bank*. Dengan adanya pemasangan *capacitor bank* diharapkan dapat mengurangi kerugian energi secara signifikan dalam jaringan.

3.1.3 Integrasi dengan GIS

Penelitian tugas akhir yang telah dilakukan selanjutnya akan diintegrasikan dengan aplikasi *Smallworld 12.3* GIS untuk mengetahui kondisi nyata secara geografis lokasi pemasangan *capacitor bank*. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan pertimbangan non-teknis dalam perencanaan pemasangan *capacitor bank* pada sistem.



Gambar 3.4 *Interface* aplikasi GIS

3.2 Data Penelitian

Penelitian tugas akhir ini menggunakan sistem distribusi radial penyulang Basuki Rahmat Kota Surabaya (51 bus) serta data referensi yang diperoleh dari hasil survei PT Hagler Bailly Indonesia dan PT. PLN.

Data yang tersedia yaitu data mengenai spesifikasi meliputi rating, *tag number*, dan jenis pembebanan trafo. Sedangkan data pembebanan pada trafo diasumsikan mengalami pembebanan *full load* sebesar 80% dari total rating. Pembebanan *full load* pada trafo diasumsikan ketika dilakukan pengukuran pada jam pembebanan puncak berdasarkan data referensi beban harian *weekday* pada tabel 3.2.

Tabel 3.1 Data pembebanan trafo

Bus	Trafo	Rating (kVA)	Remark	Pembebanan		Jam Pengukuran
				kVA	(%)	
1	-	-	-	-	-	-
2	AF103	200	Res	160	80	21
3	AF104	160	Com	128	80	21
4	AF105	250	Com	200	80	21
5	AF106	160	Pub	128	80	24
6	AF123	100	Com	80	80	21
7	AF124	200	Com	160	80	21
8	AF072	50	Com	40	80	21
9	AF132	250	Com	200	80	21
10	-	-	-	-	-	-
11	AF133	100	Com	80	80	21
12	-	-	-	-	-	-
13	AF074	100	Pub	80	80	24
14	AF704	160	Com	128	80	21
15	AF073	1250	Com	1000	80	21
16	-	-	-	-	-	-
17	AF682	100	Com	80	80	21
18	AF660	100	Com	80	80	21

Tabel 3.1 Data pembebanan trafo (lanjutan)

Bus	Trafo	Rating	Remark	Pembebanan		Jam Pengukuran
				kVA	(%)	
19	-	-	-	-	-	-
20	AF078	500	Com	400	80	21
21	-	-	-	-	-	-
22	AF080	200	Com	160	80	21
23	-	-	-	-	-	-
24	AF747	800	Pub	640	80	24
25	-	-	-	-	-	-
26	AF689	2500	Com	2000	80	21
27	AF081	160	Com	128	80	21
28	-	-	-	-	-	-
29	AF082	1250	Com	1000	80	21
30	AF084	100	Com	80	80	21
31	AF085	100	Com	80	80	21
32	-	-	-	-	-	-
33	AF087	250	Com	200	80	21
34	-	-	-	-	-	-
35	AF088	100	Com	80	80	21
36	-	-	-	-	-	-
37	AF086	800	Com	640	80	21
38	-	-	-	-	-	-
39	AF091	400	Res	320	80	21
40	AF092	160	Res	128	80	21
41	AF094	160	Com	128	80	21
42	-	-	-	-	-	-
43	AF095	200	Res	160	80	21
44	-	-	-	-	-	-

Tabel 3.1 Data pembebanan trafo (lanjutan)

Bus	Trafo	Rating	Remark	Pembebanan		Jam Pengukuran
				kVA	(%)	
45	AF093	400	Com	320	80	21
46	-	-	-	-	-	-
47	AF096	160	Res	128	80	21
48	AF097	160	Res	128	80	21
49	AF098	160	Res	128	80	21
50	AF099	160	Com	128	80	21
51	AF100	100	Res	128	80	21

Selain data pembebanan, data referensi juga memuat data faktor daya tiap jenis beban dengan asumsi faktor daya tidak berubah selama 24 jam . Asumsi ini digunakan karena faktor daya cenderung berubah setiap jam dan belum ada survei khusus mengenai karakteristiknya. Faktor daya beban residensial = 0,85, beban publik = 0,88, beban komersial = 0,87, dan beban industrial = 0,9 [4].

Tabel 3.2 Data referensi beban harian *weekday* [16]

Jam	Residensial (Res)	Publik (Pub)	Komersial (Com)	Industrial (Ind)
1	0,134	3,62	3,076	5
2	0,128	3,55	2,776	4,8
3	0,119	3,25	2,713	4,2
4	0,118	2,18	2,59	4,5
5	0,121	1,38	2,544	4,5
6	0,138	1,33	2,602	4,3
7	0,154	1,35	2,946	4
8	0,125	1,26	3,566	6
9	0,102	1,19	3,717	15

Tabel 3.2 Data referensi beban harian *weekday* (lanjutan)

Jam	Residensial (Res)	Publik (Pub)	Komersial (Com)	Industrial (Ind)
10	0,095	1,12	3,95	19
11	0,104	0,88	4,18	19,2
12	0,104	0,82	4,3	20
13	0,086	0,81	4,092	13
14	0,081	0,8	3,796	18
15	0,085	0,8	3,726	19,5
16	0,088	0,82	3,636	18,7
17	0,104	0,88	3,825	16,7
18	0,112	0,95	4,415	13
19	0,168	1,55	4,755	9,5
20	0,201	3,2	4,908	8,2
21	0,208	3,4	5,2	7
22	0,203	3,6	5,028	6,3
23	0,193	3,63	4,16	5,5
24	0,16	3,7	3,349	8

Berdasarkan data-data pembebanan trafo, data referensi beban harian, dan faktor daya masing-masing jenis beban maka dapat dilakukan estimasi pembebanan pada penyulang selama 24 jam berdasarkan persamaan (2.1) – persamaan (2.3) yang telah dijelaskan pada Bab II.

Selain estimasi pembebanan trafo, kurva beban harian juga meliputi rugi-rugi transformator. Rugi-rugi tersebut terdiri dari rugi-rugi dalam keadaan berbeban (*load losses*) dan dalam keadaan tidak berbeban (*no-load losses*). Perhitungan rugi-rugi transformator menggunakan persamaan (2.4) dan (2.5) pada Bab II dengan menggunakan data referensi *datasheet* rugi-rugi transformator yang diperoleh dari PT. PLN [17].

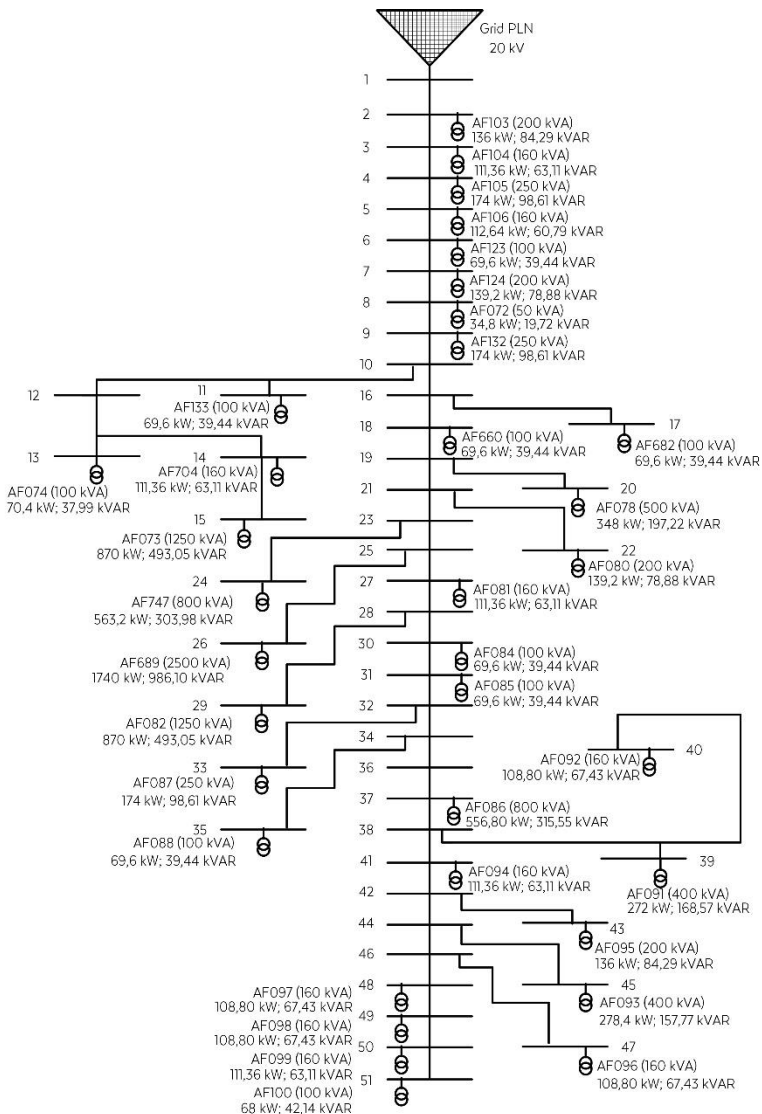
Berikut merupakan *datasheet* rugi-rugi transformator :

Tabel 3.3 *Datasheet* konstanta rugi-rugi transformator

Konstanta Rugi - Rugi Transformer 3 fasa		
Daya (kVA)	No Load Losses (W)	Load Losses (W)
1	2	3
25	75	475
50	125	800
100	210	1420
160	300	2000
200	355	2350
250	420	2750
315	500	3250
400	595	3850
500	700	4550
630	835	5400
800	1000	6850
1000	1100	8550
1250	1400	10600
1600	1680	13550
2000	1990	16900
2500	2350	21000

Setelah diperoleh hasil estimasi pembebanan setiap titik trafo pada penyulang, maka selanjutnya hasil tersebut dijumlahkan dengan rugi-rugi trafo pada setiap titik beban, sehingga diperoleh hasil estimasi pembebanan total penyulang selama 24 jam beserta kurva beban harian penyulang Basuki Rahmat Kota Surabaya.

Hasil estimasi pembebanan penyulang selama 24 jam pada setiap bus disajikan pada bagian lampiran. Kurva beban harian total penyulang yang diperoleh disajikan pada Bab IV.



Gambar 3.5 Single line diagram penyulang Basuki Rahmat

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab ini dilakukan simulasi untuk mendapatkan hasil yang kemudian dianalisis untuk menjawab permasalahan dan tujuan penelitian yang telah dipaparkan pada bab-bab sebelumnya. Simulasi pada tugas akhir ini menggunakan perangkat lunak MATLAB dan SmallWorld 12.3 (GIS). Hasil dari simulasi berupa analisis digunakan untuk mendapatkan kesimpulan dari proses penelitian tugas akhir ini.

Bab ini terdiri dari beberapa bagian pembahasan, diantaranya adalah :

1. Estimasi pembebanan harian meliputi jaringan dan trafo pada sistem distribusi.
2. Analisis aliran energi pada kondisi awal sistem distribusi.
3. Estimasi kerugian energi harian dan tahunan sistem distribusi pada kondisi awal.
4. Analisis hasil optimisasi sistem distribusi dengan pemasangan *capacitor bank* menggunakan metode analitis.
5. Penghematan energi akibat pemasangan *capacitor bank* beserta analisis aliran energi pada kondisi setelah pemasangan *capacitor bank*.
6. Estimasi kerugian energi harian dan tahunan sistem distribusi pada kondisi setelah pemasangan *capacitor bank*.
7. Lokasi geografis berbasis GIS.

4.1 Estimasi Beban Harian

Beban harian adalah beban yang diperoleh dari total penjumlahan pembebanan setiap titik trafo berdasarkan data pengukuran trafo dan data referensi masing-masing jenis beban, ditambahkan dengan rugi-rugi trafo.

4.1.1 Pembebanan Trafo

Pada penelitian tugas akhir ini, data pengukuran trafo diasumsikan berada pada pembebanan penuh dan diukur saat waktu beban puncak berdasarkan tabel referensi masing-masing jenis beban saat *weekday*. Tabel 4.1 berikut merupakan hasil salah satu estimasi pembebanan terhadap trafo selama 24 jam :

Tabel 4.1 Hasil estimasi pembebanan trafo AF103

JAM	BEBAN	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,0876	0,0543
2	0,0837	0,0519
3	0,0778	0,0482
4	0,0772	0,0478
5	0,0791	0,0490
6	0,0902	0,0559
7	0,1007	0,0624
8	0,0817	0,0507
9	0,0667	0,0413
10	0,0621	0,0385
11	0,0680	0,0421
12	0,0680	0,0421
13	0,0562	0,0348
14	0,0530	0,0328
15	0,0556	0,0344
16	0,0575	0,0357
17	0,0680	0,0421
18	0,0732	0,0454
19	0,1098	0,0681
20	0,1314	0,0814
21	0,1360	0,0843
22	0,1327	0,0823
23	0,1262	0,0782
24	0,1046	0,0648

Penyulang Basuki Rahmat Kota Surabaya memiliki trafo distribusi sejumlah 35 buah, sehingga akan didapatkan data hasil estimasi pembebanan trafo sebanyak 35 tabel. Total pembebanan pada setiap titik trafo diperoleh dengan menjumlahkan seluruh pembebanan setiap titik trafo selama 24 jam.

4.1.2 Perhitungan Rugi-rugi Trafo

Rugi-rugi yang terjadi pada transformator dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu kerugian daya dalam kondisi tanpa beban (*No Load Losses*) dan kerugian daya dalam kondisi berbeban (*Load Losses*).

Kerugian daya dalam kondisi tanpa beban memiliki nilai yang selalu tetap, sedangkan nilai kerugian daya dalam kondisi berbeban memiliki nilai yang berubah-ubah sesuai kondisi pembebanan trafo.

Kerugian pada trafo ini dapat dihitung berdasarkan datasheet konstanta rugi-rugi trafo yang diperoleh dari PT. PLN. Datasheet tersebut memuat data kVA trafo beserta masing-masing rugi-rugi *No-load losses* dan *Rated load losses*. Berikut adalah contoh hasil analisis perhitungan kerugian trafo AF103 (200 kVA) :

Tabel 4.2 Hasil analisis perhitungan kerugian trafo AF103

JAM	LOSSES		Total Losses (kW)
	Load Losses (kW)	No-Load Losses (kW)	
1	0,6242	0,355	0,9792
2	0,5696	0,355	0,9246
3	0,4923	0,355	0,8473
4	0,4840	0,355	0,8390
5	0,5090	0,355	0,8640
6	0,6620	0,355	1,0170
7	0,8244	0,355	1,1794
8	0,5432	0,355	0,8982
9	0,3617	0,355	0,7167

Tabel 4.2 Hasil analisis perhitungan kerugian trafo AF103
(lanjutan)

JAM	LOSSES		Total Losses (kW)
	Load Losses (kW)	No-Load Losses (kW)	
10	0,3137	0,355	0,6687
11	0,3760	0,355	0,7310
12	0,3760	0,355	0,7310
13	0,2571	0,355	0,6121
14	0,2281	0,355	0,5831
15	0,2512	0,355	0,6062
16	0,2692	0,355	0,6242
17	0,3760	0,355	0,7310
18	0,4361	0,355	0,7911
19	0,9812	0,355	1,3362
20	1,4045	0,355	1,7595
21	1,5040	0,355	1,8590
22	1,4326	0,355	1,7876
23	1,2949	0,355	1,6499
24	0,8899	0,355	1,2449

Total kerugian energi pada trafo dihitung berdasarkan jumlah antara kerugian energi dalam kondisi berbeban (*load losses*) dengan kerugian energi dalam kondisi tidak berbeban (*no-load losses*). Berdasarkan perhitungan, kerugian energi per hari dari 35 trafo dalam kondisi berbeban adalah 933,641 kWh, sedangkan total kerugian energi per hari dari 35 trafo dalam kondisi tidak berbeban adalah 401,64 kWh. Angka kerugian energi pada trafo pada perhitungan setiap interval jam selama 24 jam ditunjukkan pada Tabel 4.3 berikut :

Tabel 4.3 Hasil analisis perhitungan total kerugian trafo

JAM	LOSSES		Total Losses (kWh)
	Load Losses (kWh)	No-Load Losses (kWh)	
1	31,4754	16,735	48,2104
2	27,0295	16,735	43,7645
3	24,7131	16,735	41,4481
4	20,4535	16,735	37,1885
5	18,7673	16,735	35,5023
6	20,5166	16,735	37,2516
7	25,9012	16,735	42,6362
8	32,3470	16,735	49,0820
9	33,2491	16,735	49,9841
10	36,6584	16,735	53,3934
11	40,9378	16,735	57,6728
12	43,0839	16,735	59,8189
13	38,4016	16,735	55,1366
14	33,1352	16,735	49,8702
15	32,1759	16,735	48,9109
16	30,9001	16,735	47,6351
17	34,8076	16,735	51,5426
18	45,8157	16,735	62,5507
19	57,4297	16,735	74,1647
20	67,6188	16,735	84,3538
21	75,3806	16,735	92,1156
22	71,7115	16,735	88,4465
23	53,5592	16,735	70,2942
24	37,5723	16,735	54,3073
TOTAL	933,6410	401,64	1335,2810

4.1.3 Pemodelan Kurva Beban Harian

Setelah mendapatkan hasil dari perhitungan di atas, maka selanjutnya diperoleh total pembebanan beserta kurva beban harian pada penyulang Basuki Rahmat Kota Surabaya. Total pembebanan pada setiap jam ditunjukkan pada Tabel 4.4 berikut :

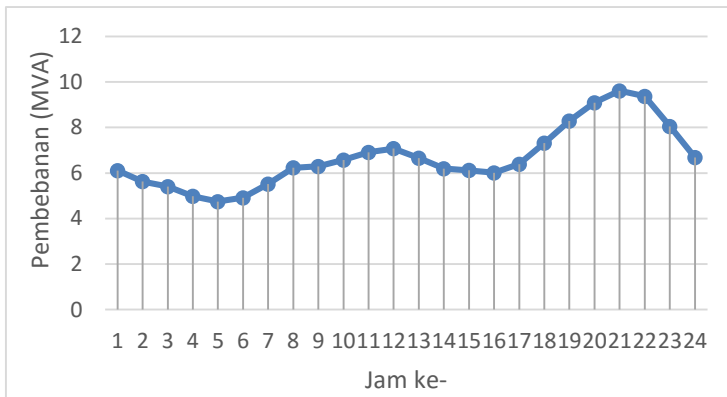
Tabel 4.4 Total pembebanan setiap jam penyulang Basuki Rahmat

JAM	Pembebanan (MVA)
1	6,1129
2	5,6236
3	5,4085
4	4,9758
5	4,7423
6	4,9168
7	5,5183
8	6,2282
9	6,2952
10	6,5777
11	6,9123
12	7,0739
13	6,6602
14	6,1957
15	6,1173
16	6,0084
17	6,3936
18	7,3198
19	8,2905
20	9,0940
21	9,6103

Tabel 4.4 Total pembebanan setiap jam penyulang Basuki Rahmat
(lanjutan)

JAM	Pembebanan (MVA)
22	9,3746
23	8,0512
24	6,6852

Sedangkan untuk kurva beban harian yang diperoleh akan memiliki bentuk dan karakteristik yang sama sesuai dengan komposisi beban penyusunnya. Kurva beban harian tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut :



Gambar 4.1 Kurva beban harian penyulang Basuki Rahmat

Kurva pembebanan harian penyulang Basuki Rahmat memiliki bentuk menyerupai kurva pembebanan harian penyulang yang bebannya bervariasi. Komposisi beban pada penyulang Basuki Rahmat terdiri atas variasi pembebanan residensial, komersial, dan publik, dengan beban komersial yang mendominasi.

4.2 Analisis Aliran Energi pada Kondisi Awal

Perhitungan dan analisis aliran energi pada tahap ini dilakukan dalam kondisi sistem keadaan awal, yakni ketika belum dilakukan pemasangan *capacitor bank*. Analisis aliran energi dilakukan berbasis analisis aliran daya dengan metode *topology network* yang dilakukan selama 24 kali atau dilakukan perhitungan selama satu hari. Hasil kerugian energi beserta nilai tegangan minimum pada setiap jam ditampilkan pada Tabel 4.5 berikut :

Tabel 4.5 Analisis kerugian energi JTM penyulang Basuki Rahmat

JAM	Kerugian Energi		Tegangan Minimum (kV)
	Aktif (kWh)	Reaktif (kVARh)	
1	7,7965	3,9003	19,9652
2	6,5932	3,2983	19,9680
3	6,0997	3,0514	19,9692
4	5,2027	2,6028	19,9714
5	4,7618	2,3824	19,9726
6	5,1386	2,5711	19,9714
7	6,4802	3,2423	19,9679
8	8,1999	4,1020	19,9642
9	8,3490	4,1763	19,9641
10	9,1074	4,5555	19,9626
11	10,0822	5,0432	19,9606
12	10,5614	5,2828	19,9597
13	9,3422	4,6728	19,9622
14	8,0814	4,0422	19,9648
15	7,8835	3,9433	19,9652
16	7,6087	3,8059	19,9658
17	8,6304	4,3170	19,9635
18	11,3099	5,6573	19,9582

Tabel 4.5 Analisis kerugian energi JTM penyulang Basuki Rahmat (lanjutan)

JAM	Kerugian Energi		Tegangan Minimum (kV)
	Aktif (kWh)	Reaktif (kVARh)	
19	14,5561	7,2818	19,9523
20	17,4419	8,7257	19,9478
21	19,4725	9,7414	19,9448
22	18,5054	9,2576	19,9462
23	13,6396	6,8237	19,9537
24	9,3607	4,6830	19,9617
	234,2050	117,1601	19,9448

Pada Tabel 4.5 di atas dapat dilihat bahwa kerugian energi per hari pada penyulang Basuki Rahmat adalah 234,2050 kWh dan tegangan minimum yang terjadi selama pengoperasian adalah 19,9448 kV. Kerugian energi pada jaringan terhitung cukup besar, sehingga perlu dilakukan *conditioning* untuk mengurangi kerugian energi dengan menggunakan pemasangan *capacitor bank* pada jaringan.

Hasil analisis aliran energi dengan 24 kali perhitungan ini akan dijadikan acuan perhitungan estimasi kerugian energi menggunakan *loss factor*.

4.3 Estimasi Kerugian Energi

Proses estimasi kerugian energi pada jaringan dihitung dengan melakukan perhitungan *load factor* terlebih dahulu. Nilai *load factor* yang diperoleh akan digunakan sebagai acuan untuk mendapatkan nilai dari *loss factor*, yang selanjutnya digunakan untuk mengestimasi kerugian energi dalam satu hari berdasarkan besarnya nilai rugi-rugi energi puncak dalam satu hari.

4.3.1 Perhitungan Load Factor

Nilai *load factor* didapatkan dari kurva total pembebanan penyulang yang telah dijumlahkan dengan kerugian trafo kondisi

berbeban. Berdasarkan persamaan (2.40) maka perhitungan nilai *load factor* penyulang Basuki Rahmat adalah 0,694509.

4.3.1 Perhitungan *Loss Factor*

Setelah nilai *load factor* didapatkan maka kita dapat menghitung nilai *loss factor* dengan menggunakan sembilan formula yang masih banyak digunakan pada perhitungan kerugian energi saat ini. Masing-masing formula menghasilkan nilai *loss factor* yang berlainan seperti pada Tabel 4.6 berikut ini :

Tabel 4.6 Hasil perhitungan *Loss Factor*

Penemu	Fs
Sochinsky	0,5012
Gustafson I	0,4993
Gustafson II	0,4981
Gangel	0,5142
Wolf	0,5175
Junge	0,5188
CitiPower	0,5248
Dewberry	0,5372
Buller	0,5460

4.3.3 Hasil Estimasi

Setelah didapatkan nilai *loss factor* dari berbagai macam metode maka dapat dilakukan estimasi kerugian energi yang terjadi selama periode yang ditentukan. Perhitungan kerugian energi dengan *loss factor* hanya memerlukan analisis aliran daya pada beban puncak sehingga didapatkan kerugian daya saat terjadi pembebanan maksimal. Tahap selanjutnya dilakukan estimasi kerugian energi dengan persamaan 2.45 yang hasilnya dapat di lihat pada tabel 4.7. Beban puncak penyulang terjadi pada interval ke 21 yaitu pukul 20.00 – 21.00 WIB. Besar kerugian daya pada beban puncak adalah 19,4725 kW pada penyulang. Nilai error pada table 4.7 di dapatkan dari

perbandingan hasil estimasi kerugian energi dengan metode analisis aliran energi sebanyak 24 kali simulasi.

Tabel 4.7 Hasil Estimasi Kerugian Energi per hari penyulang
Basuki Rahmat

Penemu	Fs	Kerugian Energi (kWh)	Error (%)
Sochinsky	0,5012	234,2240	0,01
Gustafson I	0,4993	233,3506	0,36
Gustafson II	0,4981	232,7670	0,61
Gangel	0,5142	240,2913	2,60
Wolf	0,5175	241,8428	3,26
Junge	0,5188	242,4675	3,53
CitiPower	0,5248	245,2490	4,72
Dewberry	0,5372	251,0692	7,20
Buller	0,5460	255,1644	8,95

Total kerugian energi biasanya di nyatakan dalam kerugian per tahun sebagai mana telah dijelaskan oleh persamaan 2.45. Berikut hasil estimasi kerugian energi dengan analisis aliran energi dan loss factor.

Tabel 4.8 Estimasi Kerugian Energi dengan Analisis Aliran Energi

JTM (kWh)	Losses Trafo (kWh)		Total Kerugian per hari (kWh)	Total Kerugian per tahun (MWh)
	Load	No-load		
234,2050	933,641	401,64	1569,486	572,8623

Tabel 4.9 Estimasi Kerugian Energi dengan *Loss Factor*

Penemu	JTM (kWh)	Losses Trafo (kWh)		Total Kerugian per hari (kWh)	Total Kerugian per tahun (MWh)
		Load	No-load		
Sochinsky	234,2240	933,641	401,64	1569,505	572,869
Gustafson I	233,3506	933,641	401,64	1568,631	572,550
Gustafson II	232,7670	933,641	401,64	1568,048	572,337
Gangel	240,2913	933,641	401,64	1575,572	575,083
Wolf	241,8428	933,641	401,64	1577,123	575,650
Junge	242,4675	933,641	401,64	1577,748	575,878
CitiPower	245,2490	933,641	401,64	1580,530	576,893
Dewberry	251,0692	933,641	401,64	1586,350	579,017
Buller	255,1644	933,641	401,64	1590,445	580,512

4.4 Hasil Optimisasi dengan Metode Analitis

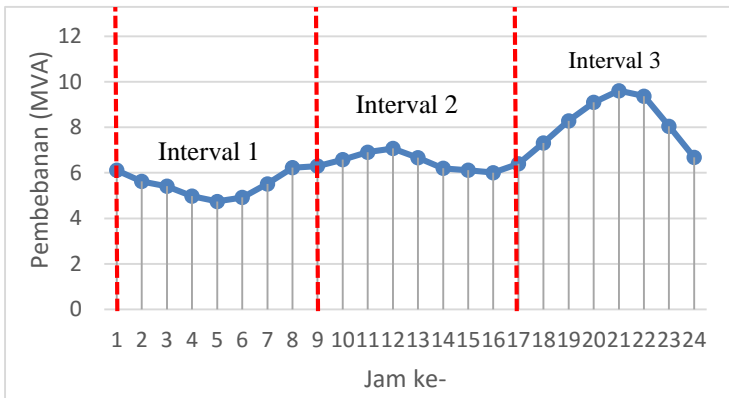
Dalam melakukan optimisasi lokasi dan kapasitas optimal *capacitor bank*, diperlukan pembagian kurva pembebanan menjadi beberapa interval. Hal ini dilakukan karena optimisasi lokasi dan kapasitas optimal *capacitor bank* tidak memungkinkan dilakukan setiap jam, oleh karena itu diperlukan pembagian interval untuk mempermudah dan menyederhanakan proses optimisasi.

Pembagian interval pada kurva pembebanan dilakukan berdasarkan besarnya pembebanan pada selang waktu tertentu. Kurva pembebanan akan dibagi menjadi 3 interval dengan kategori pembebanan rendah, pembebanan sedang, dan pembebanan tinggi.

Berdasarkan kurva pembebanan pada sub bab 4.1 mengenai estimasi pembebanan harian dapat diketahui bahwa pada interval 1, dengan pembebanan rendah, terjadi pada pukul 01.00-08.00. Interval 2, dengan kategori beban sedang, terjadi pada pukul 09.00-16.00. Sedangkan untuk interval 3, dengan kategori pembebanan tinggi, terjadi pada pukul 17.00-24.00.

Tabel 4.10 Pembagian interval kurva pembebanan

Interval	Pembebanan	Pukul	Total pembebanan (MVA)
1	Rendah	01.00 – 08.00	43,5264
2	Sedang	09.00 – 16.00	51,8407
3	Tinggi	17.00 – 24.00	64,8190

**Gambar 4.2** Kurva pembebanan dengan pembagian interval

Setelah diperoleh interval dengan masing-masing kapasitas pembebanannya, selanjutnya dilakukan simulasi berupa aliran energi untuk mengetahui kerugian energi dan level tegangan pada setiap intervalnya. Berikut merupakan hasil dari simulasi kondisi awal jaringan pada setiap interval :

Tabel 4.11 Hasil simulasi setiap interval

Interval	Rata-rata Kerugian Energi (kWh)	Tegangan minimum (kV)
1	6,22895	19,968
2	8,84881	19,964
3	13,83535	19,954

Kemudian dilakukan proses optimisasi jaringan dengan pemasangan *capacitor bank* berbasis metode analitis. Optimisasi dengan menggunakan metode analitis memiliki fungsi obyektif yaitu meminimalisasi rugi-rugi yang terjadi pada jaringan, dengan *constraint* level tegangan sebagai pertimbangan.

Dengan menggunakan persamaan (2.39) dapat dilakukan perhitungan kapasitas optimal *capacitor bank* pada setiap bus. Perhitungan dimulai pada bus 2 karena bus 1 merupakan bus dari grid PLN. Berikut merupakan hasil perhitungan kapasitas optimal *capacitor bank* pada setiap bus :

Tabel 4.12 Kapasitas optimal *capacitor bank* untuk setiap bus

Bus	Kapasitas optimal (MVAR)		
	Interval 1	Interval 2	Interval 3
2	2,6838	3,1906	3,9922
3	2,6793	3,1874	3,9862
4	2,6748	3,1829	3,9799
5	2,6612	3,1672	3,9599
6	2,6249	3,1319	3,9090
7	2,5924	3,0982	3,8626
8	2,5555	3,0563	3,8083
9	2,5505	3,0504	3,8008
10	2,5336	3,0298	3,7754
11	2,4425	2,9210	3,6397
12	2,3289	2,7884	3,4717
13	2,3044	2,7589	3,4350
14	2,2641	2,7125	3,3757
15	2,1022	2,5224	3,1358
16	2,5008	2,9876	3,7253
17	2,3629	2,8230	3,5199
18	2,4698	2,9477	3,6780

Tabel 4.12 Kapasitas optimal *capacitor bank* untuk setiap bus
(lanjutan)

Bus	Kapasitas optimal (MVAR)		
	Interval 1	Interval 2	Interval 3
19	2,4168	2,8791	3,5968
20	2,3269	2,7728	3,4633
21	2,3920	2,8467	3,5587
22	2,3498	2,7966	3,4960
23	2,3734	2,8222	3,5300
24	2,2648	2,6860	3,3656
25	2,3297	2,7748	3,4669
26	2,2426	2,6760	3,3392
27	2,2994	2,7381	3,4216
28	2,2681	2,7000	3,3746
29	2,2447	2,6728	3,3401
30	2,2114	2,6293	3,2889
31	2,1026	2,4933	3,1245
32	2,0824	2,4681	3,0940
33	2,0433	2,4220	3,0359
34	2,0471	2,4237	3,0405
35	2,0088	2,3784	2,9835
36	2,0008	2,3655	2,9703
37	1,9536	2,3106	2,9007
38	1,9439	2,2931	2,8838
39	1,9055	2,2468	2,8264
40	1,8553	2,1878	2,7520
41	1,8926	2,2306	2,8069
42	1,8434	2,1704	2,7331
43	1,8279	2,1519	2,7099

Tabel 4.12 Kapasitas optimal *capacitor bank* untuk setiap bus (lanjutan)

Bus	Kapasitas optimal (MVAR)		
	Interval 1	Interval 2	Interval 3
44	1,8066	2,1260	2,6780
45	1,7775	2,0920	2,6350
46	1,7989	2,1166	2,6664
47	1,7940	2,1107	2,6591
48	1,7423	2,0485	2,5819
49	1,6689	1,9611	2,4727
50	1,6260	1,9106	2,4091
51	1,5912	1,8694	2,3573

Kemudian penentuan lokasi optimal pemasangan kapasitor dilakukan dengan perhitungan total kerugian daya pada jaringan setiap pemasangan kapasitor pada setiap bus.

Tabel 4.13 Kerugian daya setiap pemasangan kapasitor

Pemasangan pada bus ke-	Kerugian daya (kW)		
	Interval 1	Interval 2	Interval 3
2	5,8411	8,3004	12,9760
3	5,8057	8,2495	12,8972
4	5,7829	8,2169	12,8464
5	5,7369	8,1515	12,7444
6	5,6053	7,9605	12,4502
7	5,4395	7,7207	12,0802
8	5,2176	7,4014	11,5858
9	5,1799	7,3472	11,5018
10	5,0840	7,2105	11,2888
11	5,1248	7,2687	11,3795

Tabel 4.13 Kerugian daya setiap pemasangan kapasitor (lanjutan)

Pemasangan pada bus ke-	Kerugian daya (kW)		
	Interval 1	Interval 2	Interval 3
12	5,1626	7,3192	11,4618
13	5,1737	7,3354	11,4867
14	5,1878	7,3534	11,5170
15	5,2521	7,4414	11,6580
16	5,0367	7,1460	11,1851
17	5,1018	7,2389	11,3299
18	4,9889	7,0813	11,0806
19	4,8971	6,9572	10,8801
20	4,9443	7,0233	10,9844
21	4,8620	6,9114	10,8043
22	4,8857	6,9448	10,8568
23	4,8371	6,8794	10,7507
24	4,8954	6,9719	10,8852
25	4,8023	6,8233	10,6700
26	4,8393	6,8687	10,7486
27	4,8039	6,8266	10,6741
28	4,8062	6,8312	10,6799
29	4,8189	6,8483	10,7076
30	4,8221	6,8586	10,7176
31	4,8527	6,9121	10,7905
32	4,8585	6,9222	10,8042
33	4,8835	6,9571	10,8595
34	4,8698	6,9420	10,8312
35	4,8950	6,9773	10,8868
36	4,8850	6,9689	10,8676

Tabel 4.13 Kerugian daya setiap pemasangan kapasitor (lanjutan)

Pemasangan pada bus ke-	Kerugian daya (kW)		
	Interval 1	Interval 2	Interval 3
37	4,9137	7,0076	10,9303
38	4,9102	7,0122	10,9272
39	4,9347	7,0480	10,9822
40	4,9689	7,0954	11,0575
41	4,9370	7,0529	10,9880
42	4,9635	7,0933	11,0483
43	4,9739	7,1080	11,0713
44	4,9844	7,1240	11,0952
45	5,0034	7,1499	11,1369
46	4,9891	7,1311	11,1058
47	4,9924	7,1357	11,1131
48	5,0247	7,1828	11,1854
49	5,0722	7,2503	11,2910
50	5,1008	7,2901	11,3540
51	5,1246	7,3234	11,4066

Berdasarkan perhitungan total kerugian daya setiap pemasangan kapasitor pada setiap bus, diperoleh nilai paling minimum berada pada bus 25. Hal ini menunjukkan bahwa pemasangan kapasitor pada bus 25 mengakibatkan kerugian daya pada jaringan menjadi paling minimum, sehingga dapat ditetapkan bahwa lokasi optimal pemasangan kapasitor pertama pada bus 25, dengan kapasitas kapasitor sesuai perhitungan pada tabel 4.12.

Langkah-langkah perhitungan tersebut diiterasi untuk pemasangan kapasitor berikutnya hingga diperoleh kerugian daya paling minimum dengan mempertimbangkan *constraint* tegangan. Kapasitor pertama yang terpasang pada bus 25 terlibat dalam perhitungan pemasangan kapasitor berikutnya. Hasil perhitungan untuk pemasangan kapasitor selanjutnya adalah sebagai berikut :

Tabel 4.14 Kapasitas optimal *capacitor bank* kedua setiap bus

Bus	Kapasitas optimal (MVAR)		
	Interval 1	Interval 2	Interval 3
2	0,3542	0,4159	0,5255
3	0,3497	0,4126	0,5196
4	0,3452	0,4082	0,5132
5	0,3316	0,3926	0,4932
6	0,2955	0,3574	0,4426
7	0,2631	0,3239	0,3965
8	0,2265	0,2823	0,3428
9	0,2214	0,2765	0,3354
10	0,2047	0,2560	0,3102
11	0,1980	0,2478	0,3001
12	0,2161	0,2721	0,3281
13	0,2141	0,2693	0,3249
14	0,2190	0,2768	0,3329
15	0,2232	0,2846	0,3402
16	0,1719	0,2139	0,2602
17	0,1635	0,2037	0,2476
18	0,1410	0,1741	0,2130
19	0,0881	0,1057	0,1320
20	0,0888	0,1074	0,1335
21	0,0634	0,0733	0,0941
22	0,0630	0,0731	0,0936
23	0,0447	0,0489	0,0655
24	0,0517	0,0501	0,0729
25	0,0011	0,0015	0,0024
26	0,0274	0,0377	0,0435

Tabel 4.14 Kapasitas optimal *capacitor bank* kedua untuk setiap bus
(lanjutan)

Bus	Kapasitas optimal (MVAR)		
	Interval 1	Interval 2	Interval 3
27	0,0284	0,0334	0,0428
28	0,0549	0,0642	0,0820
29	0,0574	0,0678	0,0860
30	0,0837	0,0953	0,1236
31	0,1365	0,1518	0,1996
32	0,1457	0,1617	0,2130
33	0,1440	0,1600	0,2105
34	0,1600	0,1764	0,2333
35	0,1574	0,1736	0,2295
36	0,1777	0,1943	0,2584
37	0,1775	0,1955	0,2587
38	0,1903	0,2048	0,2753
39	0,1885	0,2021	0,2724
40	0,1834	0,1966	0,2650
41	0,1958	0,2099	0,2829
42	0,1999	0,2131	0,2883
43	0,1986	0,2116	0,2864
44	0,2016	0,2146	0,2907
45	0,1997	0,2130	0,2881
46	0,2015	0,2143	0,2905
47	0,2011	0,2138	0,2898
48	0,1996	0,2114	0,2873
49	0,1953	0,2062	0,2809
50	0,1917	0,2025	0,2757
51	0,1881	0,1985	0,2705

Kemudian untuk perhitungan total kerugian daya pada jaringan guna menentukan lokasi optimal pemasangan kapasitor kedua adalah sebagai berikut :

Tabel 4.15 Kerugian daya setiap pemasangan kapasitor

Pemasangan pada bus ke-	Kerugian daya (kW)		
	Interval 1	Interval 2	Interval 3
2	4,7954	6,8139	10,6550
3	4,7950	6,8132	10,6539
4	4,7948	6,8128	10,6534
5	4,7946	6,8125	10,6529
6	4,7943	6,8117	10,6521
7	4,7941	6,8109	10,6514
8	4,7943	6,8109	10,6517
9	4,7943	6,8109	10,6517
10	4,7948	6,8116	10,6527
11	4,7950	6,8119	10,6532
12	4,7930	6,8087	10,6487
13	4,7931	6,8089	10,6489
14	4,7925	6,8077	10,6474
15	4,7912	6,8076	10,6443
16	4,7966	6,8146	10,6570
17	4,7968	6,8149	10,6576
18	4,7982	6,8171	10,6608
19	4,8005	6,8208	10,6661
20	4,8004	6,8206	10,6658
21	4,8013	6,8221	10,6679
22	4,8013	6,8220	10,6679
23	4,8018	6,8228	10,6690

Tabel 4.15 Kerugian daya setiap pemasangan kapasitor

Pemasangan pada bus ke-	Kerugian daya (kW)		
	Interval 1	Interval 2	Interval 3
24	4,8016	6,8227	10,6687
25	4,8023	6,8233	10,6700
26	4,8021	6,8230	10,6695
27	4,8020	6,8230	10,6696
28	4,8014	6,8222	10,6682
29	4,8013	6,8221	10,6680
30	4,8002	6,8207	10,6657
31	4,7965	6,8162	10,6577
32	4,7956	6,8151	10,6557
33	4,7956	6,8151	10,6558
34	4,7940	6,8133	10,6524
35	4,7941	6,8134	10,6527
36	4,7917	6,8107	10,6477
37	4,7914	6,8102	10,6470
38	4,7896	6,8087	10,6436
39	4,7896	6,8088	10,6436
40	4,7900	6,8092	10,6444
41	4,7885	6,8075	10,6412
42	4,7874	6,8065	10,6391
43	4,7875	6,8065	10,6393
44	4,7868	6,8058	10,6379
45	4,7868	6,8058	10,6379
46	4,7867	6,8058	10,6377
47	4,7867	6,8058	10,6378
48	4,7865	6,8056	10,6373

Tabel 4.15 Kerugian daya setiap pemasangan kapasitor

Pemasangan pada bus ke-	Kerugian daya (kW)		
	Interval 1	Interval 2	Interval 3
49	4,7864	6,8054	10,6373
50	4,7866	6,8059	10,6376
51	4,7869	6,8062	10,6382

Berdasarkan perhitungan total kerugian daya setiap pemasangan kapasitor pada setiap bus, diperoleh nilai paling minimum berada pada bus 49. Hal ini menunjukkan bahwa pemasangan kapasitor kedua pada bus 49 mengakibatkan kerugian daya pada jaringan menjadi paling minimum, sehingga dapat ditetapkan bahwa lokasi optimal pemasangan kapasitor kedua pada bus 49, dengan kapasitas sesuai perhitungan pada tabel 4.14.

Hasil optimisasi untuk menentukan lokasi dan kapasitas optimal *capacitor bank* menggunakan metode analitis dapat dilihat pada tabel 4.16 berikut :

Tabel 4.16 Lokasi dan kapasitas optimal *capacitor bank* pada
(a) interval 1

Kapasitor	Kapasitas Optimal (MVAR)	Lokasi Optimal
		Bus ke -
1	2,3297	25
2	0,1953	49

(b) interval 2

Kapasitor	Kapasitas Optimal (MVAR)	Lokasi Optimal
		Bus ke -
1	2,7748	25
2	0,2062	49

(c) interval 3

Kapasitor	Kapasitas Optimal (MVAR)	Lokasi Optimal
		Bus ke -
1	3,4669	25
2	0,2809	49

Melalui optimisasi dengan metode analitis diperoleh hasil bahwa lokasi optimal pemasangan kapasitor terletak pada bus 25 dan 49. Hal ini dikarenakan bus-bus tersebut memiliki pembebanan daya aktif dan reaktif yang lebih besar dibandingkan dengan bus-bus lainnya. Sehingga, ketika dilakukan kompensasi daya reaktif dengan memasang kapasitor pada bus-bus tersebut akan diperoleh penurunan rugi-rugi jaringan yang paling minimum.

Selanjutnya dilakukan proses operasi dengan memasang *capacitor bank* tersebut ke dalam jaringan sesuai dengan lokasi dan kapasitas yang telah ditentukan. Kemudian hasilnya akan dianalisis dan dibandingkan dengan kondisi awal.

Tabel 4.17 Hasil operasi *capacitor bank* pada jaringan

Interval	Sebelum Pemasangan Kapasitor	
	Rata-rata Kerugian Energi (kWh)	Tegangan minimum (kV)
1	6,22895	19,968
2	8,84881	19,964
3	13,83535	19,954
Interval	Setelah Pemasangan Kapasitor	
	Rata-rata Kerugian Energi (kWh)	Tegangan minimum (kV)
1	4,7864	19,976
2	6,8057	19,970
3	10,6373	19,964

Perbandingan saat sebelum dilakukan kompensasi dan setelah dilakukan kompensasi dengan pemasangan *capacitor bank* terlihat dari peningkatan level tegangan minimum pada jaringan dan penurunan kerugian energi. Saat sebelum dikompensasi, tegangan minimum pada jaringan adalah 19,954 kV atau 0,9977 p.u, namun setelah dilakukan optimasi maka tegangan minimum pada sistem menjadi lebih baik, yaitu 19,964 kV atau 0,9982 p.u.

Untuk rata-rata kerugian energi pada interval 3 (pembebanan tinggi) sebelum dilakukan kompensasi pemasangan kapasitor yaitu sebesar 13,83535 kWh, sedangkan setelah dilakukan optimasi maka rata-rata kerugian energi pada interval 3 turun menjadi 10,6373 kWh.

4.5 Analisis Aliran Energi pada Kondisi setelah Pemasangan *Capacitor Bank*

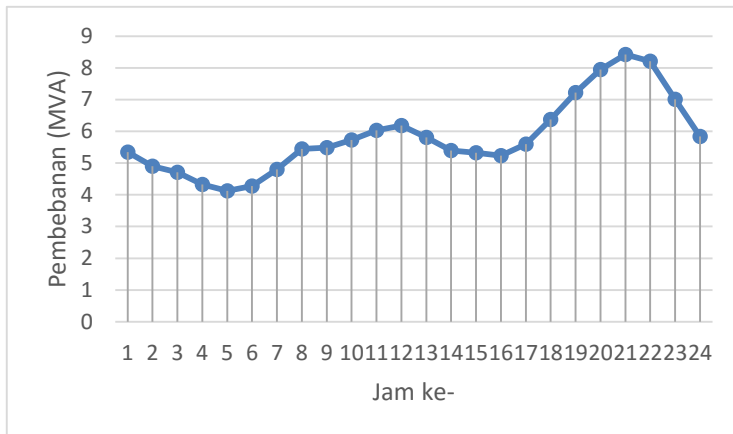
Adanya operasi pemasangan *capacitor bank* pada sistem menyebabkan berkurangnya pembebanan yang terjadi secara keseluruhan dalam sistem. Total pembebanan sistem secara keseluruhan beserta kurva beban harian yang mengalami perubahan akibat pengaruh pemasangan kapasitor adalah sebagai berikut :

Tabel 4.18 Total pembebanan sistem akibat pengaruh kapasitor

JAM	Pembebanan (MVA)
1	5,3447
2	4,9027
3	4,7113
4	4,3302
5	4,1278
6	4,2750
7	4,8011
8	5,4464
9	5,4813
10	5,7329
11	6,0325
12	6,1790
13	5,8073
14	5,3954
15	5,3262
16	5,2308
17	5,5973
18	6,3745
19	7,2229
20	7,9501

Tabel 4.18 Total pembebanan sistem akibat pengaruh kapasitor
(lanjutan)

JAM	Pembebanan (MVA)
21	8,4245
22	8,2080
23	7,0113
24	5,8376



Gambar 4.3 Kurva beban harian setelah pemasangan kapasitor

Kemudian setelah memperoleh kurva pembebanan yang baru, dilakukan analisis aliran energi untuk mengetahui kerugian energi per jam secara detail. Selain itu, melalui analisis aliran energi akan diperoleh informasi mengenai tegangan minimum pada sistem.

Hasil analisis aliran energi disajikan dalam tabel 4.19 sebagai berikut :

Tabel 4.19 Hasil aliran energi kondisi setelah pemasangan kapasitor

JAM	Kerugian Energi		Tegangan Minimum (kV)
	Aktif (kWh)	Reaktif (kVARh)	
1	5,9882	2,9957	19,9721
2	5,0654	2,5341	19,9749
3	4,6942	2,3483	19,9761
4	4,0291	2,0157	19,9784
5	3,7090	1,8556	19,9795
6	3,9782	1,9905	19,9783
7	4,9705	2,4870	19,9748
8	6,2972	3,1502	19,9712
9	6,4296	3,2162	19,9723
10	7,001	3,5019	19,9708
11	7,7428	3,873	19,9688
12	8,1126	4,058	19,9678
13	7,1804	3,5915	19,9703
14	6,2339	3,1181	19,973
15	6,0865	3,0444	19,9734
16	5,8835	2,9429	19,9739
17	6,8821	3,4424	19,9738
18	8,7761	4,3898	19,9685
19	11,1774	5,5916	19,9626
20	13,3958	6,7016	19,9581
21	14,9897	7,499	19,9551
22	14,2291	7,1184	19,9565
23	10,4886	5,2474	19,964
24	7,3868	3,6954	19,972
	180,7277	90,4088	19,9551

Pada Tabel 4.19 di atas dapat dilihat bahwa kerugian energi per hari pada penyulang Basuki Rahmat setelah dilakukan pemasangan kapasitor adalah 180,7277 kWh dan tegangan minimum yang terjadi selama pengoperasian adalah 19,9551 kV.

Hasil analisis aliran energi dengan 24 kali perhitungan ini akan dijadikan acuan perhitungan estimasi kerugian energi menggunakan loss factor.

4.6 Penghematan Energi setelah Pemasangan Kapasitor

Adanya pemasangan *capacitor bank* pada sistem tentu berdampak pada menurunnya rugi-rugi pada jaringan. Untuk mengetahui penghematan energi pada jaringan akibat pemasangan kapasitor maka perlu dilakukan estimasi kerugian energi setelah pemasangan kapasitor, yang hasilnya akan dibandingkan dengan estimasi kerugian energi sebelum dilakukan pemasangan kapasitor pada jaringan.

Proses estimasi kerugian energi pada sub bab ini memiliki prosedur yang sama dengan sub bab sebelumnya, yang membedakan hanya kurva pembebanan yang berubah akibat pemasangan kapasitor. Hal ini berdampak pada nilai *load factor* dan *loss factor* yang berubah.

4.6.1 Perhitungan Load Factor

Nilai *load factor* didapatkan dari kurva total pembebanan penyulang bernilai 0,691189.

4.6.2 Perhitungan Loss Factor

Berdasarkan nilai *load factor* tersebut maka diperoleh nilai *loss factor* sebagai berikut :

Tabel 4.20 Hasil perhitungan *Loss Factor*

Penemu	Fs
Sochinsky	0,4969
Gangel	0,5098
Gustafson I	0,4948
Gustafson II	0,4935

Tabel 4.20 Hasil perhitungan *Loss Factor* (lanjutan)

Penemu	F _s
Wolf	0,513
Junge	0,5144
CitiPower	0,5204
Dewberry	0,5327
Buller	0,5418

4.6.3 Hasil Estimasi

Estimasi kerugian energi dilakukan dengan persamaan 2.45 yang hasilnya dapat dilihat pada tabel 4.17. Beban puncak penyulang terjadi pada interval ke 21 yaitu pukul 20.00 – 21.00 WIB. Besar kerugian daya pada beban puncak adalah 14,9897 kW pada penyulang. Nilai error pada table 4.21 di dapatkan dari perbandingan hasil estimasi kerugian energi dengan metode analisis aliran energi sebanyak 24 kali simulasi.

Tabel 4.21 Hasil Estimasi Kerugian Energi per hari penyulang
Basuki Rahmat

Penemu	F _s	Kerugian Energi (kWh)	Error (%)
Sochinsky	0,4969	178,7494	1,09
Gangel	0,5098	183,3879	1,47
Gustafson I	0,4948	178,0127	1,50
Gustafson II	0,4935	177,5475	1,76
Wolf	0,5130	184,5590	2,12
Junge	0,5144	185,0460	2,39
CitiPower	0,5204	187,2273	3,60
Dewberry	0,5327	191,6312	6,03
Buller	0,5418	194,9061	7,85

Tabel 4.22 Estimasi Kerugian Energi dengan Analisis Aliran Energi

JTM (kWh)	Losses Trafo (kWh)		Total Kerugian per hari (kWh)	Total Kerugian per tahun (MWh)
	Load	No-load		
180,7277	933,641	401,64	1516,0087	553,3431

Tabel 4.23 Estimasi Kerugian Energi dengan *Loss Factor*

Penemu	JTM (kWh)	Losses Trafo (kWh)		Total Kerugian per hari (kWh)	Total Kerugian per tahun (MWh)
		Load	No-load		
Sochinsky	178,7494	933,641	401,64	1514,03	552,621
Gangel	183,3879	933,641	401,64	1518,669	554,314
Gustafson I	178,0127	933,641	401,64	1513,294	552,352
Gustafson II	177,5475	933,641	401,64	1512,828	552,182
Wolf	184,5590	933,641	401,64	1519,84	554,741
Junge	185,0460	933,641	401,64	1520,327	554,919
CitiPower	187,2273	933,641	401,64	1522,508	555,715
Dewberry	191,6312	933,641	401,64	1526,912	557,323
Buller	194,9061	933,641	401,64	1530,187	558,518

4.6.4 Penghematan Energi

Setelah dilakukan proses estimasi kerugian energi akibat pemasangan *capacitor bank* pada jaringan, diperoleh hasil bahwa kerugian energi per tahun pada jaringan adalah 553,3431 MWh. Sehingga, berdasarkan hasil ini dapat dihitung penghematan energi pada jaringan akibat pemasangan *capacitor bank* sebagai berikut :

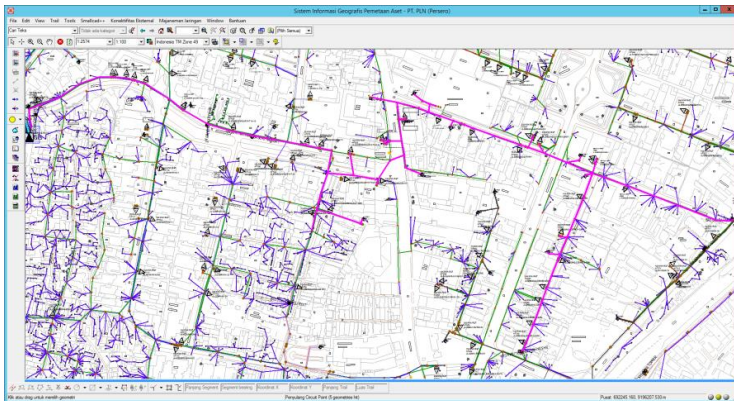
Tabel 4.24 Penghematan energi pada jaringan

Total Kerugian per tahun (MWh)		Penghematan energi (MWh)
Sebelum operasi kapasitor	Setelah operasi kapasitor	
572,8623	553,3431	19,5192

4.7 Lokasi Geografis berbasis GIS

Optimisasi penentuan lokasi dan kapasitas optimal *capacitor bank* pada tugas akhir ini juga diintegrasikan dengan sistem GIS. Pemodelan lokasi geografis secara nyata dilakukan menggunakan perangkat lunak SmallWorld 12.3 General Electric.

Berikut merupakan tampilan geografis pada GIS, penyulang Basuki Rahmat Kota Surabaya ditunjukkan dengan garis *pink* :

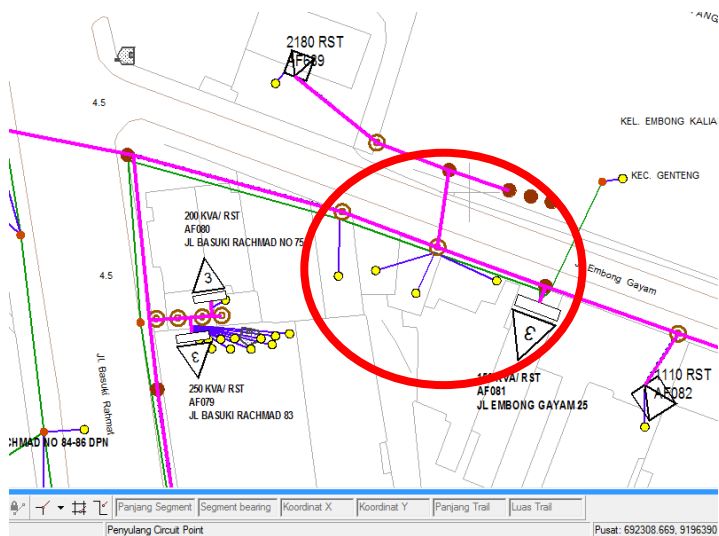


Gambar 4.4 Tampilan geografis penyulang Basuki Rahmat

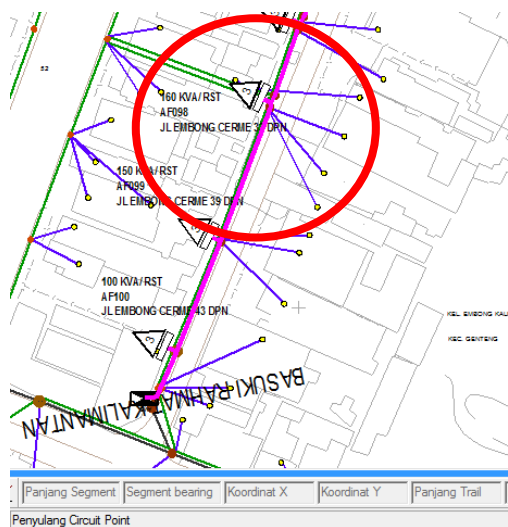
Lokasi optimal penempatan kapasitor telah berhasil ditemukan pada pembahasan sub bab sebelumnya. Berdasarkan sistem GIS pada sistem penyulang Basuki Rahmat maka lokasi tersebut dapat diketahui keadaan nyatanya sebagai berikut :

Tabel 4.25 Penempatan kapasitor berdasarkan letak geografis

Kapasitor	Lokasi Optimal	Letak Geografis
	Bus ke -	
1	25	Jl. Embong Gayam no. 25, Surabaya
2	49	Jl. Embong Cerme no. 33 dpn, Surabaya



Gambar 4.5 Letak geografis pemasangan kapasitor pertama



Gambar 4.6 Letak geografis pemasangan kapasitor kedua

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis data pada penelitian tugas akhir ini, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Estimasi pembebanan harian pada penyulang Basuki Rahmat menghasilkan kurva pembebanan yang memiliki karakteristik menyerupai kurva dengan beban bervariasi. Hal ini disebabkan oleh komposisi beban pada penyulang terdiri dari beban residensial, komersial, dan publik, dengan beban komersial sebagai beban dominan pada penyulang.
2. Metode analisis mampu menentukan lokasi dan kapasitas optimal *capacitor bank* berdasarkan pemodelan total rugi daya jaringan ke dalam persamaan matematis yang dideferensialkan terhadap variabel kapasitas *capacitor bank*.
3. Perhitungan kerugian energi menggunakan analisis aliran energi memerlukan 24 kali simulasi aliran energi, sedangkan dengan menggunakan metode *loss factor* hanya memerlukan satu kali simulasi ketika beban puncak.
4. Penyulang Basuki Rahmat mengalami kerugian energi per tahun sebesar 572,8623 MWh. Dengan pemasangan kapasitor pada lokasi dan kapasitas yang optimal pada bus 25 dan bus 49 maka dapat mengurangi kerugian energi per tahun menjadi sebesar 553,3431 MWh. Terjadi penghematan energi sebesar 19,519 MWh.
5. Formula *loss factor* yang memiliki nilai error terkecil terhadap hasil analisis aliran energi pada penyulang Basuki Rahmat adalah formula Sochinsky.
6. Letak geografis pemasangan kapasitor pada penyulang Basuki Rahmat berdasarkan GIS terletak pada Jalan Embong Gayam 25 Surabaya dan Jalan Embong Cerme 32 DPN Surabaya.

5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan pada penelitian ini adalah :

1. Menambahkan pertimbangan pengaruh nonteknis pada analisis lokasi dan kapasitas optimal *capacitor bank* seperti kondisi lingkungan, kondisi geografis, kelayakan implementasi pada

lokasi terpilih, dan maksimal kapasitas kapasitor yang mampu diimplementasikan kedalam lokasi tersebut.

2. Metode analitis ini hanya untuk sistem kelistrikan dengan topologi radial, sehingga perlu dikembangkan untuk bentuk kelistrikan lain seperti loop, mesh, ring, dan *weakly mesh*.
3. Perlu adanya survei yang akurat dan lebih detail pada proses pencatatan data-data yang dibutuhkan, seperti interval pengukuran trafo.

DAFTAR PUSTAKA

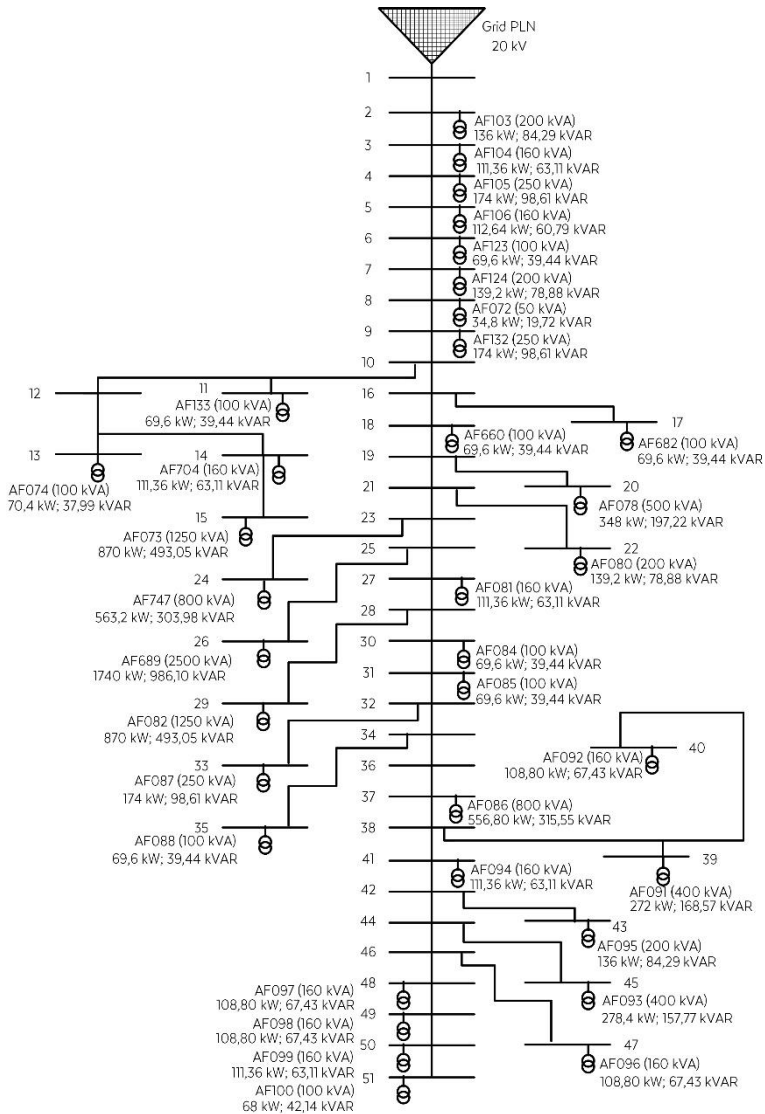
- [1] Heneka Yoma Priyanga, "*Pengembangan Software Analisis Aliran Energi Tiga Fasa Untuk Estimasi Aliran Energi Tiga Fasa Pada Jaringan Distribusi*," Tugas Akhir Teknik Elektro - ITS, 2005.
- [2] M.Zaini Rohmawan, "*Identifikasi Karakteristik Jenis Beban Pada Jaringan Distribusi Radial Untuk Estimasi Pembebanan Trafo Distribusi*," Tugas Akhir Teknik Elektro - ITS, 2006.
- [3] Tah, Avisha; Das, Depariya;, "*Novel Analytical Method for the Placement and Sizing of Distributed Generation Unit on Distribution Networks with and without considering P and PQV buses*," *ELSEVIER* , Vols. 401 - 413, no. Electrical Power and Energy Systems, p. 13, 2015.
- [4] Sabiq, Saifi. "*Estimasi Kerugian Energi Jaringan Distribusi Radial Pada Penyulang NR7 20 kV Kota Medan Menggunakan Loss Factor*", Tugas Akhir Teknik Elektro – ITS, 2016.
- [5] L. Liu, C. Sun, Q. Zhou and Q. Den, "*A Novel Electrical On-Line Monitoring System Based on Geographic Information System*," *IEEE*, Vols. P1-33, p. 4, 2001.
- [6] A. Soeprijanto, *Desain Kontroller untuk Kestabilan Dinamik Sistem Tenaga Listrik*, Surabaya: itspress, 2012.
- [7] Turan Gonen, "*Electric Power Distribution System Engineering*", McGraw-Hill Book Company, 1987.
- [8] Retno Dwi Maharti, "*Ramalan Beban Berdasarkan Estimasi Beban Puncak Untuk Kebutuhan Tenaga Listrik Di Jawa Timur Sampai Tahun 2000*", Tugas Akhir Teknik Elektro - ITS, 1985.
- [9] Jeff Triptett, Stephen Riniel, Jim Foote., "*Evaluating Distribution System Losses Using Data From Deployed AMI dan GIS System*", IEEE Rural Power Conference (REPC), 2010.
- [10] Hadi Saadat, "*Power System Analysis*", Milwaukee: WCB McGraw-Hill, 1999.
- [11] A. G. Bhutad, S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, "*Three - Phase Load Flow Method for Radial Distribution Networks*," *IEEE*, Vols. 0-7803-7651-X/03/S17.00, no. Power System, p. 5, 2003.

- [12] Firmansah, A.F. "*Penentuan Lokasi dan Ukuran Optimal Distributed Generation (DG) Menggunakan Metode Analitis pada Jaringan Distribusi Radial dengan Mempertimbangkan Rugi-rugi Jaringan Daya Listrik dan Profil Tegangan Berbasis Geographical Information System (GIS)*", Tugas Akhir Teknik Elektro – ITS, 2016.
- [13] A. Yadav and L. Srivastava, "*Optimal placement of distributed generation: An overview and key issues,*" in International Conference on Power Signals Control and Computations (EPSCICON), 2014, 2014, pp. 1–6.
- [14] J.Dickert, M. Hable, P. Schegner, "*Energy Loss Estimation in Distribution Network for Planning Purpose*", IEEE Bucharest Power Tech Conference, 2009.
- [15] I. Wainwright, "*Engineering the benefits of a geographical information system: the business case for GIS,*" Engineering the Benefits of Geographical Information System, vol. 1997/105, p. 7, 1997.
- [16] PT. Hagler Bailly Indonesia, "*Load Characteristics Survey*", PT. PLN Persero, Jakarta, Juni 1997.
- [17] SPLN D3.002-1: 2007, Spesifikasi Transformator Distribusi.

LAMPIRAN

Halaman ini sengaja dikosongkan

1. Single Line Diagram Penyulang Basuki Rahmat



2. Data Pembebanan Bus Setiap Jam

- Bus 2

Jam	Bus 2	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,088595	0,0542991
2	0,084617	0,0518678
3	0,078655	0,0482209
4	0,077993	0,0478157
5	0,079979	0,0490313
6	0,091248	0,05592
7	0,101872	0,0624035
8	0,082629	0,0506522
9	0,067409	0,0413322
10	0,062784	0,0384957
11	0,068731	0,0421426
12	0,068731	0,0421426
13	0,056843	0,0348487
14	0,053545	0,0328226
15	0,056183	0,0344435
16	0,058163	0,0356591
17	0,068731	0,0421426
18	0,074022	0,0453844
19	0,111182	0,0680765
20	0,133183	0,0814487
21	0,137859	0,0842852
22	0,134518	0,0822591
23	0,127842	0,078207
24	0,105860	0,0648348

- **Bus 3**

Jam	Bus 3	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,066622	0,0373324
2	0,060114	0,0336914
3	0,058748	0,0329268
4	0,056083	0,0314339
5	0,055087	0,0308757
6	0,056343	0,0315796
7	0,063801	0,0357546
8	0,077269	0,0432793
9	0,080555	0,045112
10	0,085629	0,0479398
11	0,090643	0,0507312
12	0,093261	0,0521876
13	0,088724	0,0496632
14	0,082275	0,0460708
15	0,080751	0,0452212
16	0,078792	0,0441289
17	0,082906	0,0464227
18	0,095772	0,0535833
19	0,103200	0,0577098
20	0,106547	0,0595667
21	0,112940	0,0631106
22	0,109173	0,0610231
23	0,090207	0,0504885
24	0,072551	0,0406457

- **Bus 4**

Jam	Bus 4	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,103964	0,0583318
2	0,093811	0,0526428
3	0,091680	0,0514481
4	0,087522	0,0491155
5	0,085967	0,0482432
6	0,087928	0,0493431
7	0,099563	0,0558666
8	0,120572	0,0676239
9	0,125696	0,0704874
10	0,133609	0,0749059
11	0,141426	0,0792675
12	0,145508	0,0815432
13	0,138434	0,0775988
14	0,128378	0,0719856
15	0,126001	0,0706581
16	0,122947	0,0689514
17	0,129363	0,0725355
18	0,149421	0,083724
19	0,161001	0,0901716
20	0,166217	0,093073
21	0,176180	0,0986103
22	0,170310	0,0953486
23	0,140746	0,0788883
24	0,113213	0,0635089

- **Bus 5**

Jam	Bus 5	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,111730	0,0594821
2	0,109552	0,0583319
3	0,100228	0,0534024
4	0,067111	0,0358207
5	0,042490	0,0226755
6	0,040955	0,0218539
7	0,041569	0,0221826
8	0,038807	0,0207037
9	0,036660	0,0195535
10	0,034514	0,0184033
11	0,027162	0,0144597
12	0,025326	0,0134738
13	0,025020	0,0133095
14	0,024714	0,0131452
15	0,024714	0,0131452
16	0,025326	0,0134738
17	0,027162	0,0144597
18	0,029305	0,0156099
19	0,047712	0,0254689
20	0,098676	0,0525809
21	0,104888	0,0558672
22	0,111107	0,0591535
23	0,112041	0,0596464
24	0,114220	0,0607966

- **Bus 6**

Jam	Bus 6	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,041699	0,0233327
2	0,037625	0,0210571
3	0,036770	0,0205792
4	0,035102	0,0196462
5	0,034478	0,0192973
6	0,035264	0,0197372
7	0,039933	0,0223466
8	0,048367	0,0270496
9	0,050425	0,028195
10	0,053604	0,0299624
11	0,056745	0,031707
12	0,058385	0,0326173
13	0,055543	0,0310395
14	0,051502	0,0287942
15	0,050548	0,0282632
16	0,049321	0,0275806
17	0,051898	0,0290142
18	0,059958	0,0334896
19	0,064614	0,0360686
20	0,066711	0,0372292
21	0,070719	0,0394441
22	0,068358	0,0381394
23	0,056472	0,0315553
24	0,045412	0,0254035

- **Bus 7**

Jam	Bus 7	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,083223	0,0466654
2	0,075095	0,0421142
3	0,073389	0,0411584
4	0,070060	0,0392924
5	0,068816	0,0385946
6	0,070385	0,0394745
7	0,079700	0,0446932
8	0,096521	0,0540992
9	0,100625	0,0563899
10	0,106961	0,0599247
11	0,113222	0,063414
12	0,116491	0,0652345
13	0,110826	0,062079
14	0,102772	0,0575884
15	0,100869	0,0565265
16	0,098423	0,0551611
17	0,103561	0,0580284
18	0,119625	0,0669792
19	0,128900	0,0721373
20	0,133078	0,0744584
21	0,141059	0,0788883
22	0,136357	0,0762789
23	0,112678	0,0631106
24	0,090629	0,0508071

- **Bus 8**

Jam	Bus 8	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,020890	0,0116664
2	0,018849	0,0105286
3	0,018421	0,0102896
4	0,017585	0,0098231
5	0,017273	0,0096486
6	0,017667	0,0098686
7	0,020005	0,0111733
8	0,024231	0,0135248
9	0,025262	0,0140975
10	0,026855	0,0149812
11	0,028430	0,0158535
12	0,029252	0,0163086
13	0,027827	0,0155198
14	0,025802	0,0143971
15	0,025323	0,0141316
16	0,024709	0,0137903
17	0,026000	0,0145071
18	0,030041	0,0167448
19	0,032375	0,0180343
20	0,033427	0,0186146
21	0,035437	0,0197221
22	0,034253	0,0190697
23	0,028293	0,0157777
24	0,022750	0,0127018

- **Bus 9**

Jam	Bus 9	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,103964	0,0583318
2	0,093811	0,0526428
3	0,091680	0,0514481
4	0,087522	0,0491155
5	0,085967	0,0482432
6	0,087928	0,0493431
7	0,099563	0,0558666
8	0,120572	0,0676239
9	0,125696	0,0704874
10	0,133609	0,0749059
11	0,141426	0,0792675
12	0,145508	0,0815432
13	0,138434	0,0775988
14	0,128378	0,0719856
15	0,126001	0,0706581
16	0,122947	0,0689514
17	0,129363	0,0725355
18	0,149421	0,083724
19	0,161001	0,0901716
20	0,166217	0,093073
21	0,176180	0,0986103
22	0,170310	0,0953486
23	0,140746	0,0788883
24	0,113213	0,0635089

- **Bus 10**

Jam	Bus 10	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0

- **Bus 11**

Jam	Bus 11	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,041699	0,0233327
2	0,037625	0,0210571
3	0,036770	0,0205792
4	0,035102	0,0196462
5	0,034478	0,0192973
6	0,035264	0,0197372
7	0,039933	0,0223466
8	0,048367	0,0270496
9	0,050425	0,028195
10	0,053604	0,0299624
11	0,056745	0,031707
12	0,058385	0,0326173
13	0,055543	0,0310395
14	0,051502	0,0287942
15	0,050548	0,0282632
16	0,049321	0,0275806
17	0,051898	0,0290142
18	0,059958	0,0334896
19	0,064614	0,0360686
20	0,066711	0,0372292
21	0,070719	0,0394441
22	0,068358	0,0381394
23	0,056472	0,0315553
24	0,045412	0,0254035

- Bus 12

Jam	Bus 12	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0

- **Bus 13**

Jam	Bus 13	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,069958	0,0371763
2	0,068593	0,0364574
3	0,062749	0,0333765
4	0,042004	0,0223879
5	0,026594	0,0141722
6	0,025633	0,0136587
7	0,026017	0,0138641
8	0,024289	0,0129398
9	0,022946	0,0122209
10	0,021604	0,0115021
11	0,017005	0,0090373
12	0,015857	0,0084212
13	0,015665	0,0083185
14	0,015474	0,0082158
15	0,015474	0,0082158
16	0,015857	0,0084212
17	0,017005	0,0090373
18	0,018346	0,0097562
19	0,029861	0,015918
20	0,061776	0,032863
21	0,065669	0,034917
22	0,069568	0,0369709
23	0,070153	0,037279
24	0,071519	0,0379979

- **Bus 14**

Jam	Bus 14	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,066622	0,0373324
2	0,060114	0,0336914
3	0,058748	0,0329268
4	0,056083	0,0314339
5	0,055087	0,0308757
6	0,056343	0,0315796
7	0,063801	0,0357546
8	0,077269	0,0432793
9	0,080555	0,045112
10	0,085629	0,0479398
11	0,090643	0,0507312
12	0,093261	0,0521876
13	0,088724	0,0496632
14	0,082275	0,0460708
15	0,080751	0,0452212
16	0,078792	0,0441289
17	0,082906	0,0464227
18	0,095772	0,0535833
19	0,103200	0,0577098
20	0,106547	0,0595667
21	0,112940	0,0631106
22	0,109173	0,0610231
23	0,090207	0,0504885
24	0,072551	0,0406457

- **Bus 15**

Jam	Bus 15	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,518412	0,2916591
2	0,467780	0,2632138
3	0,457152	0,2572403
4	0,436410	0,2455777
5	0,428654	0,2412161
6	0,438433	0,2467155
7	0,496466	0,2793328
8	0,601210	0,3381197
9	0,626749	0,3524372
10	0,666180	0,3745297
11	0,705130	0,3963377
12	0,725462	0,4077158
13	0,690224	0,3879938
14	0,640115	0,3599278
15	0,628272	0,3532905
16	0,613048	0,3447569
17	0,645023	0,3626775
18	0,744954	0,4186199
19	0,802621	0,4508579
20	0,828590	0,465365
21	0,878184	0,4930517
22	0,848966	0,4767431
23	0,701742	0,3944414
24	0,564527	0,3175443

- **Bus 16**

Jam	Bus 16	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0

- **Bus 17**

Jam	Bus 17	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,041699	0,0233327
2	0,037625	0,0210571
3	0,036770	0,0205792
4	0,035102	0,0196462
5	0,034478	0,0192973
6	0,035264	0,0197372
7	0,039933	0,0223466
8	0,048367	0,0270496
9	0,050425	0,028195
10	0,053604	0,0299624
11	0,056745	0,031707
12	0,058385	0,0326173
13	0,055543	0,0310395
14	0,051502	0,0287942
15	0,050548	0,0282632
16	0,049321	0,0275806
17	0,051898	0,0290142
18	0,059958	0,0334896
19	0,064614	0,0360686
20	0,066711	0,0372292
21	0,070719	0,0394441
22	0,068358	0,0381394
23	0,056472	0,0315553
24	0,045412	0,0254035

- **Bus 18**

Jam	Bus 18	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,041699	0,0233327
2	0,037625	0,0210571
3	0,036770	0,0205792
4	0,035102	0,0196462
5	0,034478	0,0192973
6	0,035264	0,0197372
7	0,039933	0,0223466
8	0,048367	0,0270496
9	0,050425	0,028195
10	0,053604	0,0299624
11	0,056745	0,031707
12	0,058385	0,0326173
13	0,055543	0,0310395
14	0,051502	0,0287942
15	0,050548	0,0282632
16	0,049321	0,0275806
17	0,051898	0,0290142
18	0,059958	0,0334896
19	0,064614	0,0360686
20	0,066711	0,0372292
21	0,070719	0,0394441
22	0,068358	0,0381394
23	0,056472	0,0315553
24	0,045412	0,0254035

- **Bus 19**

Jam	Bus 19	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0

- **Bus 20**

Jam	Bus 20	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,207574	0,1166636
2	0,187308	0,1052855
3	0,183055	0,1028961
4	0,174753	0,0982311
5	0,171649	0,0964864
6	0,175563	0,0986862
7	0,198790	0,1117331
8	0,240717	0,1352479
9	0,250941	0,1409749
10	0,266726	0,1498119
11	0,282320	0,1585351
12	0,290460	0,1630863
13	0,276352	0,1551975
14	0,256292	0,1439711
15	0,251550	0,1413162
16	0,245456	0,1379028
17	0,258256	0,145071
18	0,298265	0,167448
19	0,321354	0,1803431
20	0,331753	0,186146
21	0,351612	0,1972207
22	0,339912	0,1906972
23	0,280964	0,1577766
24	0,226033	0,1270177

- **Bus 21**

Jam	Bus 21	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0

- **Bus 22**

Jam	Bus 22	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,083223	0,0466654
2	0,075095	0,0421142
3	0,073389	0,0411584
4	0,070060	0,0392924
5	0,068816	0,0385946
6	0,070385	0,0394745
7	0,079700	0,0446932
8	0,096521	0,0540992
9	0,100625	0,0563899
10	0,106961	0,0599247
11	0,113222	0,063414
12	0,116491	0,0652345
13	0,110826	0,062079
14	0,102772	0,0575884
15	0,100869	0,0565265
16	0,098423	0,0551611
17	0,103561	0,0580284
18	0,119625	0,0669792
19	0,128900	0,0721373
20	0,133078	0,0744584
21	0,141059	0,0788883
22	0,136357	0,0762789
23	0,112678	0,0631106
24	0,090629	0,0508071

- Bus 23

Jam	Bus 23	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0

- **Bus 24**

Jam	Bus 24	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,556219	0,2974105
2	0,545403	0,2916595
3	0,499085	0,2670122
4	0,334353	0,1791036
5	0,211668	0,1133775
6	0,204014	0,1092696
7	0,207076	0,1109128
8	0,193301	0,1035186
9	0,182591	0,0977676
10	0,171884	0,0920165
11	0,135198	0,0722987
12	0,126033	0,0673692
13	0,124505	0,0665477
14	0,122978	0,0657261
15	0,122978	0,0657261
16	0,126033	0,0673692
17	0,135198	0,0722987
18	0,145894	0,0780497
19	0,237704	0,1273443
20	0,491371	0,2629044
21	0,522237	0,2793359
22	0,553129	0,2957674
23	0,557765	0,2982321
24	0,568584	0,3039832

- Bus 25

Jam	Bus 25	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0

- **Bus 26**

Jam	Bus 26	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	1,036330	0,583318
2	0,935073	0,526428
3	0,913820	0,514481
4	0,872338	0,491155
5	0,856828	0,482432
6	0,876384	0,493431
7	0,992441	0,558666
8	1,201909	0,676239
9	1,252983	0,704874
10	1,331836	0,749059
11	1,409727	0,792675
12	1,450386	0,815432
13	1,379919	0,775988
14	1,279712	0,719856
15	1,256027	0,706581
16	1,225583	0,689514
17	1,289526	0,725355
18	1,489365	0,83724
19	1,604684	0,901716
20	1,656615	0,93073
21	1,755790	0,986103
22	1,697362	0,953486
23	1,402952	0,788883
24	1,128552	0,635089

- **Bus 27**

Jam	Bus 27	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,066622	0,037332
2	0,060114	0,033691
3	0,058748	0,032927
4	0,056083	0,031434
5	0,055087	0,030876
6	0,056343	0,03158
7	0,063801	0,035755
8	0,077269	0,043279
9	0,080555	0,045112
10	0,085629	0,04794
11	0,090643	0,050731
12	0,093261	0,052188
13	0,088724	0,049663
14	0,082275	0,046071
15	0,080751	0,045221
16	0,078792	0,044129
17	0,082906	0,046423
18	0,095772	0,053583
19	0,103200	0,05771
20	0,106547	0,059567
21	0,112940	0,063111
22	0,109173	0,061023
23	0,090207	0,050488
24	0,072551	0,040646

- **Bus 28**

Jam	Bus 28	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0

- **Bus 29**

Jam	Bus 29	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,518412	0,291659
2	0,467780	0,263214
3	0,457152	0,25724
4	0,436410	0,245578
5	0,428654	0,241216
6	0,438433	0,246715
7	0,496466	0,279333
8	0,601210	0,33812
9	0,626749	0,352437
10	0,666180	0,37453
11	0,705130	0,396338
12	0,725462	0,407716
13	0,690224	0,387994
14	0,640115	0,359928
15	0,628272	0,353291
16	0,613048	0,344757
17	0,645023	0,362677
18	0,744954	0,41862
19	0,802621	0,450858
20	0,828590	0,465365
21	0,878184	0,493052
22	0,848966	0,476743
23	0,701742	0,394441
24	0,564527	0,317544

- **Bus 30**

Jam	Bus 30	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,041699	0,023333
2	0,037625	0,021057
3	0,036770	0,020579
4	0,035102	0,019646
5	0,034478	0,019297
6	0,035264	0,019737
7	0,039933	0,022347
8	0,048367	0,02705
9	0,050425	0,028195
10	0,053604	0,029962
11	0,056745	0,031707
12	0,058385	0,032617
13	0,055543	0,03104
14	0,051502	0,028794
15	0,050548	0,028263
16	0,049321	0,027581
17	0,051898	0,029014
18	0,059958	0,03349
19	0,064614	0,036069
20	0,066711	0,037229
21	0,070719	0,039444
22	0,068358	0,038139
23	0,056472	0,031555
24	0,045412	0,025404

- **Bus 31**

Jam	Bus 31	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,041699	0,023333
2	0,037625	0,021057
3	0,036770	0,020579
4	0,035102	0,019646
5	0,034478	0,019297
6	0,035264	0,019737
7	0,039933	0,022347
8	0,048367	0,02705
9	0,050425	0,028195
10	0,053604	0,029962
11	0,056745	0,031707
12	0,058385	0,032617
13	0,055543	0,03104
14	0,051502	0,028794
15	0,050548	0,028263
16	0,049321	0,027581
17	0,051898	0,029014
18	0,059958	0,03349
19	0,064614	0,036069
20	0,066711	0,037229
21	0,070719	0,039444
22	0,068358	0,038139
23	0,056472	0,031555
24	0,045412	0,025404

- Bus 32

Jam	Bus 32	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0

- **Bus 33**

Jam	Bus 33	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,103964	0,058332
2	0,093811	0,052643
3	0,091680	0,051448
4	0,087522	0,049116
5	0,085967	0,048243
6	0,087928	0,049343
7	0,099563	0,055867
8	0,120572	0,067624
9	0,125696	0,070487
10	0,133609	0,074906
11	0,141426	0,079268
12	0,145508	0,081543
13	0,138434	0,077599
14	0,128378	0,071986
15	0,126001	0,070658
16	0,122947	0,068951
17	0,129363	0,072535
18	0,149421	0,083724
19	0,161001	0,090172
20	0,166217	0,093073
21	0,176180	0,09861
22	0,170310	0,095349
23	0,140746	0,078888
24	0,113213	0,063509

- **Bus 34**

Jam	Bus 34	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0

- **Bus 35**

Jam	Bus 35	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,041699	0,023333
2	0,037625	0,021057
3	0,036770	0,020579
4	0,035102	0,019646
5	0,034478	0,019297
6	0,035264	0,019737
7	0,039933	0,022347
8	0,048367	0,02705
9	0,050425	0,028195
10	0,053604	0,029962
11	0,056745	0,031707
12	0,058385	0,032617
13	0,055543	0,03104
14	0,051502	0,028794
15	0,050548	0,028263
16	0,049321	0,027581
17	0,051898	0,029014
18	0,059958	0,03349
19	0,064614	0,036069
20	0,066711	0,037229
21	0,070719	0,039444
22	0,068358	0,038139
23	0,056472	0,031555
24	0,045412	0,025404

- **Bus 36**

Jam	Bus 36	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0

- **Bus 37**

Jam	Bus 37	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,331903	0,186662
2	0,299495	0,168457
3	0,292693	0,164634
4	0,279417	0,15717
5	0,274453	0,154378
6	0,280712	0,157898
7	0,317856	0,178773
8	0,384898	0,216397
9	0,401245	0,22556
10	0,426483	0,239699
11	0,451414	0,253656
12	0,464429	0,260938
13	0,441874	0,248316
14	0,409800	0,230354
15	0,402219	0,226106
16	0,392475	0,220644
17	0,412941	0,232114
18	0,476905	0,267917
19	0,513817	0,288549
20	0,530439	0,297834
21	0,562184	0,315553
22	0,543482	0,305116
23	0,449246	0,252442
24	0,361419	0,203228

- **Bus 38**

Jam	Bus 38	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0

- **Bus 39**

Jam	Bus 39	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,176848	0,108598
2	0,168913	0,103736
3	0,157017	0,096442
4	0,155696	0,095631
5	0,159660	0,098063
6	0,182141	0,11184
7	0,203330	0,124807
8	0,164946	0,101304
9	0,134572	0,082664
10	0,125340	0,076991
11	0,137211	0,084285
12	0,137211	0,084285
13	0,113478	0,069697
14	0,106892	0,065645
15	0,112160	0,068887
16	0,116113	0,071318
17	0,137211	0,084285
18	0,147771	0,090769
19	0,221895	0,136153
20	0,265742	0,162897
21	0,275059	0,16857
22	0,268404	0,164518
23	0,255101	0,156414
24	0,211284	0,12967

- **Bus 40**

Jam	Bus 40	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,070924	0,043439
2	0,067739	0,041494
3	0,062965	0,038577
4	0,062435	0,038253
5	0,064025	0,039225
6	0,073048	0,044736
7	0,081556	0,049923
8	0,066147	0,040522
9	0,053962	0,033066
10	0,050259	0,030797
11	0,055020	0,033714
12	0,055020	0,033714
13	0,045503	0,027879
14	0,042863	0,026258
15	0,044975	0,027555
16	0,046560	0,028527
17	0,055020	0,033714
18	0,059256	0,036307
19	0,089012	0,054461
20	0,106634	0,065159
21	0,110380	0,067428
22	0,107704	0,065807
23	0,102356	0,062566
24	0,084750	0,051868

- **Bus 41**

Jam	Bus 41	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,066622	0,037332
2	0,060114	0,033691
3	0,058748	0,032927
4	0,056083	0,031434
5	0,055087	0,030876
6	0,056343	0,03158
7	0,063801	0,035755
8	0,077269	0,043279
9	0,080555	0,045112
10	0,085629	0,04794
11	0,090643	0,050731
12	0,093261	0,052188
13	0,088724	0,049663
14	0,082275	0,046071
15	0,080751	0,045221
16	0,078792	0,044129
17	0,082906	0,046423
18	0,095772	0,053583
19	0,103200	0,05771
20	0,106547	0,059567
21	0,112940	0,063111
22	0,109173	0,061023
23	0,090207	0,050488
24	0,072551	0,040646

- **Bus 42**

Jam	Bus 42	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0

- **Bus 43**

Jam	Bus 43	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,088595	0,054299
2	0,084617	0,051868
3	0,078655	0,048221
4	0,077993	0,047816
5	0,079979	0,049031
6	0,091248	0,05592
7	0,101872	0,062403
8	0,082629	0,050652
9	0,067409	0,041332
10	0,062784	0,038496
11	0,068731	0,042143
12	0,068731	0,042143
13	0,056843	0,034849
14	0,053545	0,032823
15	0,056183	0,034443
16	0,058163	0,035659
17	0,068731	0,042143
18	0,074022	0,045384
19	0,111182	0,068077
20	0,133183	0,081449
21	0,137859	0,084285
22	0,134518	0,082259
23	0,127842	0,078207
24	0,105860	0,064835

- **Bus 44**

Jam	Bus 44	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0

- **Bus 45**

Jam	Bus 45	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,166142	0,093331
2	0,149920	0,084228
3	0,146516	0,082317
4	0,139871	0,078585
5	0,137387	0,077189
6	0,140519	0,078949
7	0,159110	0,089386
8	0,192672	0,108198
9	0,200856	0,11278
10	0,213494	0,119849
11	0,225978	0,126828
12	0,232495	0,130469
13	0,221200	0,124158
14	0,205140	0,115177
15	0,201344	0,113053
16	0,196466	0,110322
17	0,206713	0,116057
18	0,238744	0,133958
19	0,257231	0,144275
20	0,265557	0,148917
21	0,281459	0,157777
22	0,272090	0,152558
23	0,224892	0,126221
24	0,180917	0,101614

- **Bus 46**

Jam	Bus 46	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0

- **Bus 47**

Jam	Bus 47	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,070924	0,043439
2	0,067739	0,041494
3	0,062965	0,038577
4	0,062435	0,038253
5	0,064025	0,039225
6	0,073048	0,044736
7	0,081556	0,049923
8	0,066147	0,040522
9	0,053962	0,033066
10	0,050259	0,030797
11	0,055020	0,033714
12	0,055020	0,033714
13	0,045503	0,027879
14	0,042863	0,026258
15	0,044975	0,027555
16	0,046560	0,028527
17	0,055020	0,033714
18	0,059256	0,036307
19	0,089012	0,054461
20	0,106634	0,065159
21	0,110380	0,067428
22	0,107704	0,065807
23	0,102356	0,062566
24	0,084750	0,051868

- **Bus 48**

Jam	Bus 48	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,070924	0,043439
2	0,067739	0,041494
3	0,062965	0,038577
4	0,062435	0,038253
5	0,064025	0,039225
6	0,073048	0,044736
7	0,081556	0,049923
8	0,066147	0,040522
9	0,053962	0,033066
10	0,050259	0,030797
11	0,055020	0,033714
12	0,055020	0,033714
13	0,045503	0,027879
14	0,042863	0,026258
15	0,044975	0,027555
16	0,046560	0,028527
17	0,055020	0,033714
18	0,059256	0,036307
19	0,089012	0,054461
20	0,106634	0,065159
21	0,110380	0,067428
22	0,107704	0,065807
23	0,102356	0,062566
24	0,084750	0,051868

- **Bus 49**

Jam	Bus 49	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,070924	0,043439
2	0,067739	0,041494
3	0,062965	0,038577
4	0,062435	0,038253
5	0,064025	0,039225
6	0,073048	0,044736
7	0,081556	0,049923
8	0,066147	0,040522
9	0,053962	0,033066
10	0,050259	0,030797
11	0,055020	0,033714
12	0,055020	0,033714
13	0,045503	0,027879
14	0,042863	0,026258
15	0,044975	0,027555
16	0,046560	0,028527
17	0,055020	0,033714
18	0,059256	0,036307
19	0,089012	0,054461
20	0,106634	0,065159
21	0,110380	0,067428
22	0,107704	0,065807
23	0,102356	0,062566
24	0,084750	0,051868

- **Bus 50**

Jam	Bus 50	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,066622	0,037332
2	0,060114	0,033691
3	0,058748	0,032927
4	0,056083	0,031434
5	0,055087	0,030876
6	0,056343	0,03158
7	0,063801	0,035755
8	0,077269	0,043279
9	0,080555	0,045112
10	0,085629	0,04794
11	0,090643	0,050731
12	0,093261	0,052188
13	0,088724	0,049663
14	0,082275	0,046071
15	0,080751	0,045221
16	0,078792	0,044129
17	0,082906	0,046423
18	0,095772	0,053583
19	0,103200	0,05771
20	0,106547	0,059567
21	0,112940	0,063111
22	0,109173	0,061023
23	0,090207	0,050488
24	0,072551	0,040646

- **Bus 51**

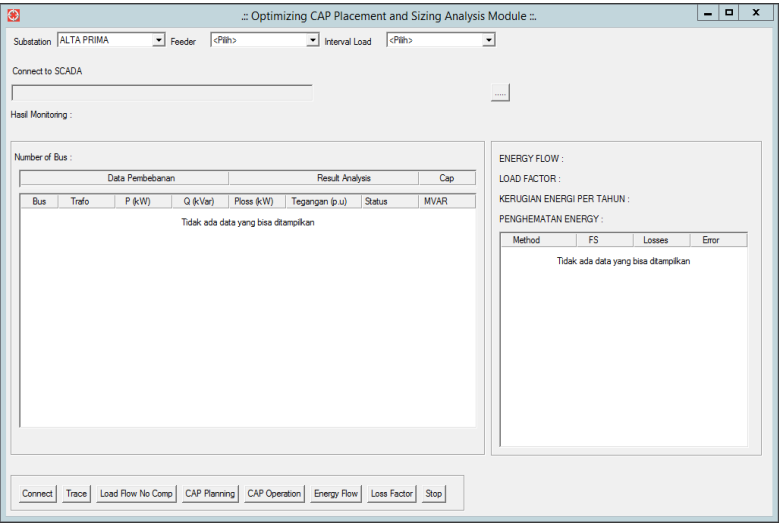
Jam	Bus 51	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0,044395	0,02715
2	0,042400	0,025934
3	0,039411	0,02411
4	0,039079	0,023908
5	0,040075	0,024516
6	0,045725	0,02796
7	0,051054	0,031202
8	0,041404	0,025326
9	0,033775	0,020666
10	0,031457	0,019248
11	0,034437	0,021071
12	0,034437	0,021071
13	0,028481	0,017424
14	0,026829	0,016411
15	0,028150	0,017222
16	0,029142	0,01783
17	0,034437	0,021071
18	0,037089	0,022692
19	0,055726	0,034038
20	0,066770	0,040724
21	0,069119	0,042143
22	0,067441	0,04113
23	0,064089	0,039103
24	0,053055	0,032417

3. Data Saluran penyulang Basuki Rahmat

LINE DATA			
Dari	Ke	R (p.u)	X (p.u)
1	2	0.021476	0.010738
2	3	0.002039	0.00102
3	4	0.001351	0.000675
4	5	0.002843	0.001422
5	6	0.008388	0.004194
6	7	0.010741	0.005371
7	8	0.014902	0.007451
8	9	0.002555	0.001278
9	10	0.00681	0.003405
10	11	0.002673	0.001336
10	12	0.007266	0.003633
12	13	0.000842	0.000421
12	14	0.002591	0.001295
14	15	0.007151	0.003575
10	16	0.004894	0.002447
16	17	0.004473	0.002237
16	18	0.005034	0.002517
18	19	0.009855	0.004928
19	20	0.003678	0.001839
19	21	0.004327	0.002164
21	22	0.001741	0.00087
21	23	0.003261	0.001631
23	24	0.005131	0.002566
23	25	0.006283	0.003141
25	26	0.005351	0.002675

LINE DATA			
Dari	Ke	R (p.u)	X (p.u)
27	28	0.002803	0.001401
28	29	0.001302	0.000651
28	30	0.004422	0.002211
30	31	0.009406	0.004703
31	32	0.001884	0.000942
32	33	0.002472	0.001236
32	34	0.003305	0.001653
34	35	0.002489	0.001244
34	36	0.004525	0.002263
36	37	0.003537	0.001769
36	38	0.005295	0.002647
38	39	0.002961	0.001481
38	40	0.00678	0.00339
38	41	0.004649	0.002324
41	42	0.00787	0.003935
42	43	0.001297	0.000648
42	44	0.003561	0.00178
44	45	0.002609	0.001305
44	46	0.000728	0.000364
46	47	0.000426	0.000213
46	48	0.005398	0.002699
48	49	0.0074	0.0037
49	50	0.004528	0.002264
50	51	0.003781	0.001891

4. Tampilan GUI pada aplikasi GIS



RIWAYAT HIDUP PENULIS



Rizky Nafiar Rafiandi dilahirkan di Jember pada 09 Mei 1996. Penulis memulai jenjang pendidikan di SDN Kebonagung II Sukodono, SMP Negeri 1 Sidoarjo, SMA Negeri 1 Sidoarjo hingga lulus pada tahun 2013. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan studi perguruan tinggi tingkat sarjana di Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Di Teknik Elektro, penulis mendalami bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Pada tahun 2015, penulis terpilih menjadi salah satu peserta dalam program CSR PT. XL Axiata, Tbk bernama *XL Future Leaders*. Penulis bersama 149 orang mahasiswa lain dari seluruh penjuru Indonesia tergabung dalam *Batch 4*. Pada tahun 2016, penulis melakukan kerja praktek di PT. Pertamina (Persero) Refinery Unit IV Cilacap selama 1 bulan. Penulis juga memiliki pengalaman sebagai *content writer* salah satu blog *engineering* selama 1 bulan. Selama masa kuliah, penulis aktif di berbagai organisasi kampus, seperti menjadi Staff Kementerian Aplikasi Teknologi Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) ITS “Kolaborasi” periode 2014-2015, Ketua Klub Keilmiah Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATEKTRO) ITS periode 2015-2016, dan Ketua Trainer Keilmiah ITS “Navigator” periode 2016-2017. Selain itu, sejak tahun 2015 penulis menjadi asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik dengan bidang Mesin Listrik, Elektronika daya dan *Renewable Energy*. Dalam bidang karya tulis, penulis pernah merasakan atmosfer Pekan Ilmiah Mahasiswa Nasional (PIMNAS) ke-27 di Universitas Diponegoro sebagai presenter penelitian bidang karsa cipta. Selain itu, penulis juga pernah meraih beberapa penghargaan karya tulis maupun esai di tingkat nasional, serta menjadi Top 10 sekaligus salah satu perwakilan Indonesia dalam *bootcamp YSEALI World of Food Innovation Challenge* 2016 di Singapura.

Penulis dapat dihubungi melalui alamat email rizkynafiar@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan